Universidade Federal de Sergipe

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

Núcleo de Engenharia Mecânica

Adequação no Funcionamento de uma Usina de Beneficiamento de Gás Carbônico

por

EDUNOEL RAIMUNDO LEAL BELÉM FILHO

Trabalho de Conclusão de Curso

São Cristóvão – SE

Julho de 2011

Universidade Federal de Sergipe

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

Núcleo de Engenharia Mecânica

Adequação no Funcionamento de uma Usina de Beneficiamento de Gás Carbônico

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica, entregue como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

EDUNOEL RAIMUNDO LEAL BELÉM FILHO

São Cristóvão - SE

Julho de 2011

ADEQUAÇÃO NO FUNCIONAMENTO DE UMA USINA DE GÁS CARBÔNICO

EDUNOEL RAIMUNDO LEAL BELÉM FILHO

‘Esse documento foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico e aprovado em sua forma final pelo colegiado do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Sergipe.’

____

Prof. Dr. Wilson Luciano de Souza
Coordenador do Trabalho de Conclusão de Curso

Banca Examinadora:

Nota

____

Prof. Dr. Wilson Luciano de Souza
Orientador

____

Prof. Dr. Paulo Mário Machado de Araujo

____

Prof.Dr. Seyyed Said Dana

Média Final:

Agradeço a Deus, meus pais,
Diana Ribeiro e Edunoel Belém,
meus irmãos, Rayssa minha namorada,
toda minha família e amigos
pelo amor e carinho depositados a mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ser refúgio e refrigério nos momentos de infortúnio e de descrença. Obrigado Pai por me ensina a orar.

Ao meu pai Edunoel e minha mãe Diana pela educação e carinho incondicionais prestados a mim em todos os momentos.

Aos professores que não economizaram esforços para oferecer o seu melhor transferindo os seus conhecimentos e experiências profissionais. Em especial ao Professor, Wilson Luciano, pela dedicação e paciência na orientação deste trabalho.

A minha namorada Rayssa, por estar sempre ao meu lado e acreditar que o futuro nós reserva a felicidade plena.

A todos os meus colegas de trabalho e amigos pela compreensão e apoio na realização desse projeto.

Não deixo, todavia de experimentar uma extrema satisfação com o progresso que penso já haver feito na indagação da verdade e de conceber tais esperanças para o futuro que, se entre as ocupações dos homens, puramente humanas, alguma existe solidamente boa e importante, ouço, crer que foi a que escolhi.

(Decartes)

RESUMO

Medições confirmaram que após o aumento da capacidade produtiva da usina de gás carbônico de 1200 kg/h para 1500 kg/h os valores de umidade relativa do CO_2 na entrada da unidade de purificação de uma usina de beneficiamento atingem o valor de 6,71%, onde o mesmo não pode exceder 5,85%, tal fato levou a elaboração de uma estratégia de análise específica nos três equipamentos responsáveis pela ineficiência no sistema de desidratação. Inicialmente foram realizados, nos dois trocadores de calor, calibração nos instrumentos aferidores de temperatura e pressão e testes de estanqueidade, assim como comparados os parâmetros operacionais reais com os previamente estabelecidos pelo padrão técnico da usina. Análises termodinâmicas feitas nesses mesmos equipamentos encontraram valores satisfatórios para as eficiências exergéticas de 52% para o resfriador e 81% para o desumidificador, o que evidencia problemas inerentes ao filtro secador. A alumina que preenche o filtro foi trocada por uma nova, porém a falta de especificação na umidade de saída do filtro persiste. Com auxílio dos representantes do fabricante do filtro, foi verificada a necessidade do aumento volumétrico da alumina, com isso conclui-se que é mais viável economicamente a compra de um par desses equipamentos de mesmo porte que o atual do que a substituição por um maior. A viabilidade econômica da solução proposta foi embasada com análise de retorno do capital.

Palavras-chave: Usina de Gás Carbônico; Umidade e Análise Termodinâmica.

ABSTRACT

The loss of carbon dioxide is a major source of loss related to the loss of raw materialin the unit of AmBev and Sergipe, seek a solution to overcome this problem is quite challenging and very relevant given the difficulties inherent in the process ofprocessing (purification) of carbon dioxide. The treatment plant CO_2 was thereforechosen as design studies and analysis in this work of completing the course, whichhas as main objective to seek viable alternatives that can minimize these losses and thus reduce the costs of the company. However, it is important to mention that among the losses caused by inefficient plant's carbon dioxide, the significant presence of moisture in the gas after passing through the drying stage is the most striking itemcontrol. The dehydrated gas at the plant now has 6.71% moisture, an amountexceeding 5.85%, which is the most desirable to operate properly functioning. Afterthe thermodynamic analysis andanalysis of field operation has been concluded thatthe first two equipment responsible for the dehydration of the gas cooler and drier,with yields were as expected, 52% and 81% respectively, the last stage of drying,drier alumina, showed inefficiency in gas dehydration. It was found that this abnormality began to occur after an increase of the plant's production capacity of 1200 kg / h to 1500 kg / h of carbon dioxide. The project proposes usingthermodynamic analysis increase in volumetric capacity of alumina in the filter drieras providential action in the readjustment of the plant. The verification of the feasibility of the project, analyzed by Payback, indicates a rapid return on investment required

Keywords: Plant Carbon Dioxide, Moisture and Energy Study.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

GPT – Grau de Perfeição Termodinâmico

c_v – Calor específico a volume constante, kJ/kg

ex – Exergia específica, kJ/kg

h – Entalpia específica, kJ/kg

$\dot{I}$ – Taxa de geração de irreversibilidade, kW

$\dot{m}$ – Fluxo mássico, kg/s

$\dot{Q}$ – Taxa de transferência de calor, kW

T – Temperatura, ºC

$\dot{S}_{ger}$ – Geração de entropia, kW

s – Entropia específica, kJ/kg.K

$\dot{W}$ – Potência, kW

η – Eficiência pela Primeira Lei

ε – Eficiência pela Segunda Lei

SUMÁRIO

ANEXOS

1 INTRODUÇÃO

A perda de gás carbônico é uma das maiores fontes de prejuízo relacionado à perda de matéria prima atualmente na Unidade Sergipe da AmBev e, buscar uma solução para contornar este problema é bastante desafiador, e de grande relevância dado as dificuldades inerentes ao processo de beneficiamento (purificação) do gás carbônico.

No conteúdo do projeto é citado os estudos e análises desenvolvidos durante o acompanhamento da rotina de funcionamento, análises termodinâmicas, contatos com empresas fabricantes e fornecedoras de peças e serviços contemplados na usina, trabalhos realizados com operação técnica e orientações do coordenador técnico do projeto. Contudo, destaca-se o estudo desenvolvido para readequar o funcionamento da usina de beneficiamento de gás carbônico que ocorre no setor de Utilidades da unidade Sergipe, pois de acordo com levantamentos recentes realizados na viabilização do projeto, o setor de utilidades apresenta uma taxa relativamente alta de perdas durante processo.

Diversos fatores afetam o beneficiamento do gás carbônico, dentre os quais: grau de pureza, umidade do gás após filtros desidratadores e capacidade de liquefação da usina (ENGEL, 2002). O primeiro por ser, dentre os fatores de perdas por qualidade do gás, o item de controle mais importante por se tratar de uma das principais medidas de controle da qualidade. Realmente, impurezas dissolvidas no gás carbônico, a partir de certa quantidade, impactam diretamente no que é mais importante quanto ao seu uso final, carbonatação da cerveja, no sabor do produto. A quantidade de água presente no gás após filtros desidratadores, foco principal de estudo neste trabalho, é extremamente maléfico a todo sistema, pois impossibilita o funcionamento de alguns equipamentos essenciais para maior ganho no beneficiamento. Por último, as perdas decorrentes da ineficiência do poder de liquefação da usina que acaba por elevar a pressão de todo o sistema limitando o volume de gás carbônico liquefeito.

Portanto, o objetivo do projeto em readequar o funcionamento da usina de beneficiamento foi entender como a usina se organiza entre suas manutenções, operações e produção e como os problemas que causam as perdas financeiras podem ser geridos de forma a aumentar cada vez mais a qualidade do produto final e eficiência da produção. Para tanto, foram desenvolvidos, implantados e adequados na usina rotinas para dar soluções próprias a eventuais anormalidades. Neste processo foi fundamental o envolvimento dos técnicos da área e fabricantes dos equipamentos.

A descrição do local de trabalho é extremamente necessária para o entendimento de como os problemas são gerados e sua resolução. O conhecimento dos princípios de funcionamento das máquinas, de seus elementos, seus riscos para a segurança e de seu programa de manutenção é de primordial importância para entender o papel da formação em Engenharia Mecânica que é a de ajudar na resolução de problemas e simplificar o aprendizado sobre as máquinas para a operação de maneira que o conhecimento ajude-os a aumentar seus resultados

Finalmente, é apresentado o problema de ineficiência da usina gerada pela baixa captação do gás, de maneira explicativa e numérica para melhor compreensão.

2 OBJETIVOS

2.1 Gerais

O que se pretende alcançar com o desenvolvimento técnico desse projeto são melhorias em potencial de usinas de beneficiamento de CO_2 para que as plantas possam operar próximo de sua capacidade nominal.

2.2 Específicos

- Identificar os pontos de anomalias da usina;
- Avaliar os parâmetros de funcionamento dos equipamentos críticos;
- Identificar o equipamento mais impactante da não operabilidade da unidade de purificação;
- Propor melhorias ao sistema;
- Propor solução economicamente viável.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

Este capítulo trata da evolução histórica do gás carbônico, parâmetros de controle para seu uso, definição técnica de cada componente da usina de beneficiamento e plano de manutenção preventiva dos equipamentos da usina.

3.2 Propriedades gerias dos CO_2

O dióxido de carbono, ou anidrido carbônico, ou gás carbônico é um composto químico constituído por dois átomos de oxigênio e um átomo de carbono. A representação química é CO_2. O dióxido de carbono foi descoberto pelo escocês Joseph Black em 1754. Estruturalmente o dióxido de carbono é constituído por moléculas de geometria linear e de caráter apolar. Por isso as atrações intermoleculares são muito fracas, tornando-o, nas condições ambientais, um gás. Daí o seu nome comercial gás carbônico.

O dióxido de carbono é essencial à vida no planeta. Visto que é um dos compostos essenciais para a realização da fotossíntese, processo pelo qual os organismos fotossintetizantes transformam a energia solar em energia química. Esta energia química, por sua vez é distribuída para todos os seres vivos por meio da teia alimentar. Este processo é uma das fases do ciclo do carbono e é vital para a manutenção dos seres vivos.

A concentração de CO_2 na atmosfera começou a aumentar no final do século XVIII, quando ocorreu a revolução industrial, a qual demandou a utilização de grandes quantidades de carvão mineral e petróleo como fontes de energia. Desde então, a concentração de CO_2 passou de 280 ppm (partes por milhão) no ano de 1750, para os 368 ppm atuais, representando um incremento de aproximadamente 30%. Este acréscimo na concentração de CO_2 implica no aumento da capacidade da atmosfera em reter calor e, mas não conseqüentemente, da temperatura do planeta, pois houve decréscimos de temperatura também neste período. As emissões de CO_2 continuam a crescer e, provavelmente, a concentração deste gás poder alcançar 550 ppm por volta do ano 2100 (PITANGA, 2008).

3.3 Dados informações e conhecimentos

O processo de beneficiamento do gás carbônico envolve uma sequência de passos necessários para: Desidratação, purificação e condensação. O gás em questão ao ser obtido da fermentação da cerveja necessita obrigatoriamente de passar por filtros lavadores, compressores, desidratadores, purificadores e condensadores.

O gás carbônico e os produtos químicos coadjuvante são submetidos a análises de pureza e concentração ao longo de todo processo de beneficiamento. O objetivo desses testes é garantir qualidade no produto final e correção dos parâmetros fora de faixa antes que o gás seja condensado. A tabela 1 e 2 nos indica os parâmetros desejados no processo.

Tabela 1 – Itens de controle necessários para consumo do CO_2

ITENS DE CONTROLE			
	VALOR ASSEGURADO	**MÉTODO**	**FREQUÊNCIA MÍNIMA**
Pureza do CO_2 na distribuição para carbonatação	≥99,99% Cerveja (filtração),	Análise com bureta volumétrica ou analisador eletrônico na saída de distribuição	Uma vez por turno (cerveja), Diário (Refrigerante)
Pureza do CO_2 na distribuição para inertização	≥99,80%	Análise com bureta volumétrica ou Obisphere na saída de distribuição	Uma vez por turno
Isenção de gosto e odor no CO_2 de distribuição	Sim	Organdéptico na saída de distribuição (borbulhamento em água destilhada e teste do gelo seco, conforme padrão	Diário
Isenção de óleo e graxa no CO_2 de distribuição	Sim	Teste de câmfora na saída de distribuição	Diário
Teor de SO_2 no CO_2 produzido	Máx. 100 ppb	Leitura direta no medidor eletrônico	Uma vez por turno
Teor de SOx no CO_2 produzido	Máx. 100 ppb	Leitura direta no medidor eletrônico	Uma vez por turno
Teor de O_2 no CO_2 produzido	Máx. 20 ppm	Leitura direta no medidor eletrônico	Uma vez por turno

Fonte: Dados da Union Engenharia. - Estância/SE - 2011

Tabela 2 – Parâmetro de controle necessários para consumo do CO_2

PARÂMETROS DE CONTROLE			
	VALOR ASSEGURADO	MÉTODO	FREQUÊNCIA SUGERIDA
Pureza do CO_2 na entrada do condensador (fábrica com stripper)	≥99,80%	Análise com bureta volumétrica ou Obisphere na entrada da usina e saída do purificador	Uma vez por turno
Pureza do CO_2 na entrada do condensador (fábrica com stripper)	≥95%	Análise com bureta volumétrica ou Obisphere na entrada da usina e saída do purificador	Uma vez por turno
Temperatura final de regeneração do carvão saída do fluido de regeneração	≥140ºC	Leitura direta no indicador de temperatura na saída dos gases de regeneração	A cada regeneração
Isenção de óleo e graxa no CO_2 de distribuição	Sim	Teste de cânfora na saída de distribuição (0018-PT-03301.005-LC)	Diário
Concentração de permaganato - ativo	0,3 a 4,0%	Titulometria	Diário
Temperatura do CO_2 após evaporar	20 a 40ºC	Leitura direta no indicador de temperatura evaporador	Uma vez por turno
Temperatura final de regeneração do secador saída do fluido de regeneração	≥120°C	Leitura direta no indicador de temperatura inferior do secador	A cada regeneração

Fonte: Dados da Union Engenharia. - Estância/SE - 2011

A seguir são descritos: o objetivo do uso dos equipamentos, seu princípio de funcionamento e os instrumentos necessários para o correto funcionamento de uma usina de tratamento de gás carbônico.

3.3.1 Separador de espuma

Após saída dos tanques fermentadores, a pressão relativa de 0,30 bar, o CO_2 entra na usina. O primeiro equipamento da planta é o separador de espuma que tem como função prevenir a passagem de espuma na entrada da usina.

A distribuição interna dos bicos injetores possibilita a formação de uma ampla nuvem de água e garantindo a remoção da espuma e outras substâncias sólidas.

Toda água utilizada provém do pré-lavador através de uma bomba de dreno, proporcionando economia da mesma. Fabricado em aço inox 304.

Equipado com:

- Sensor de nível alto (segurança);
- Válvula de sopro, que opera de acordo com os sensores de nível do balão, funcionando como segurança para evitar o rompimento do mesmo;
- Válvula de Bloqueio, que atua de acordo com a operação da usina e o sensor de nível alto do balão;
- Bicos injetores (spray) que garantem a correta distribuição da água dentro do vaso para a lavagem do gás;
- Dreno automático (respiro);
- Válvula manual de dreno.

3.3.2 Pré-lavador

Equipamento que tem por finalidade remover substâncias solúveis em água, principalmente álcool.

O pré-lavador utiliza água drenada do pós-lavador, que posteriormente será reaproveitada pelo separador de espuma.

São utilizados como referência para o cálculo de dimensionamento das torres:

- Volume de CO_2;
- Perda de carga;
- Quantidade de água;
- Quantidade de álcool a ser removido;
- Tempo de contato água e gás

Fabricado em aço inox 304 (ENGEL, 2002).

3.3.3 Lavador de permanganato

Equipamento que tem por finalidade remover compostos de Enxofre, tais como H_2S, COS e DMS.

Equipado com:

- Recheio plástico;
- Bomba de recirculação;
- Demister;
- Prato distribuidor;
- Visor de nível;
- Conjunto de válvulas para retro lavagem da bomba;
- Vaso misturador incluindo agitador;
- Válvula de dreno.

São utilizados como referência para o cálculo de dimensionamento da torre:

- Volume de CO_2;
- Perda de carga;
- Quantidade de solução circulando (curva de operação);
- Quantidade de compostos a serem removidos;
- Tempo de contato solução e gás.
- Fabricado em aço inox 304

Considerações Importantes:

- Preparo da solução:

Misturar 35g de permanganato de potássio ($KMnO_2$) para cada litro de água quente (60º a 70º C), por aproximadamente 60 minutos (agitador).

- Controle da solução (diariamente):

Cor: recolher uma amostra do lavador e verificar se a cor atual da solução é a mesma do preparo inicial. Caso a solução tenha perdido sua cor original lilás ou tenha se tornado marrom, substituí-la.

- Consumo:

Considerar 0,2 kg de permanganato de potássio para cada tonelada de CO_2, desde que respeitado o limite dos compostos do enxofre do projeto.

- Controle da vazão:

Evitar um diferencial de pressão superior a 3barg na descarga da bomba, o que poderia provocar um aquecimento desnecessário da solução.

- Funcionamento da bomba:

Deve ser contínuo, independente do status da usina de CO_2, evitando-se assim a incrustação de resíduos no rotor e seu posterior travamento.

- Limpeza da torre:

A torre deve ser aberta a cada 90 dias para a retirada dos sais acumulados no fundo.

O recheio plástico deve ser retirado para limpeza manual externa a cada 6 meses de operação (ENGEL, 2002).

3.3.4 Pós-lavador

Equipamento que tem por finalidade remover substâncias solúveis em água, remanescentes no gás, além de evitar o arraste do vapor da solução de permanganato para o balão, protegendo-o também contra sobre pressão.

Equipado com:

- Recheio plástico;
- Bomba de dreno;
- Demister;
- Bico de spray;
- Válvulas para ajuste/bloqueio da vazão de água;
- Rotâmetro;
- Sensor de vazão (segurança);
- Visor de nível;
- Válvula de dreno.

A torre é desenhada de forma a proporcionar o menor consumo de água possível. O pré-lavador utiliza água drenada do pós-lavador, que posteriormente será reaproveitada pelo separador de espuma.

Para proteger o balão contra sobre pressão, a torre possui um selo d’água de aproximadamente 250 mmca que ao romper purga o gás bruto para atmosfera.

São utilizados como referência para o cálculo de dimensionamento das torres:

- Volume de CO_2;
- Perda de carga;
- Quantidade de água (razão de 2:1);
- Tempo de contato água e gás.

3.3.5 Declorador

Equipamento que tem por finalidade remover Cloro (Cl-) da água para as torres lavadoras impedindo a oxidação do aço inox.

Equipado com:

- Carvão Ativado;
- Válvulas de bloqueio;
- Válvula by-pass;
- Válvula de dreno.

Fabricado em aço inox 304.

Tipo de carvão utilizado: betuminoso sem impregnação.

O vaso é desenhado para garantir que o carvão ativado seja capaz de reter os íons de Cloro (Cl-), de acordo com a vazão de água necessária para suprir os lavadores da usina, impedindo a corrosão do sistema.

O carvão ativado deve ser substituído a cada 6 meses de operação.

3.3.6 Balão

Equipamento que tem por finalidade acumular o CO_2 proveniente dos lavadores e controlar a capacidade de carga dos compressores de CO_2, permitindo que a planta opere sem partidas e paradas constantes.

Equipado com:

- Sensores ou transmissor de nível;
- Manômetro tipo “U” (mmca);
- Válvulas de dreno.
- Fabricado em PVC reforçado e projetado para suportar uma pressão de até 500mmca.
- Possui entrada e saída de CO_2 independentes.
- Seu tamanho varia de acordo com a capacidade de compressão da usina, de modo a garantir que a mesma opere com sua menor capacidade durante 10 minutos.

3.3.7 Compressores de CO_2

Equipamento que tem como função comprimir o CO_2 gasoso. O compressor utilizado na usina de tratamento de CO_2 é do tipo alternativo.

Esse tipo de máquina se utiliza de um sistema biela-manivela para converter o movimento rotativo de um eixo no movimento translacional de um pistão ou embolo, como mostra a figura abaixo. Dessa maneira, a cada rotação do acionador, o pistão efetua um percurso de ida e outro de vinda na direção do cabeçote, estabelecendo um ciclo de operação.

Equipado com:

- Transmissores de temperatura e pressão;
- Sensores;
- Trocadores de calor;
- Separadores de líquido;
- Purgadores mecânicos;
- Válvulas de segurança;
- Válvulas de bloqueio.

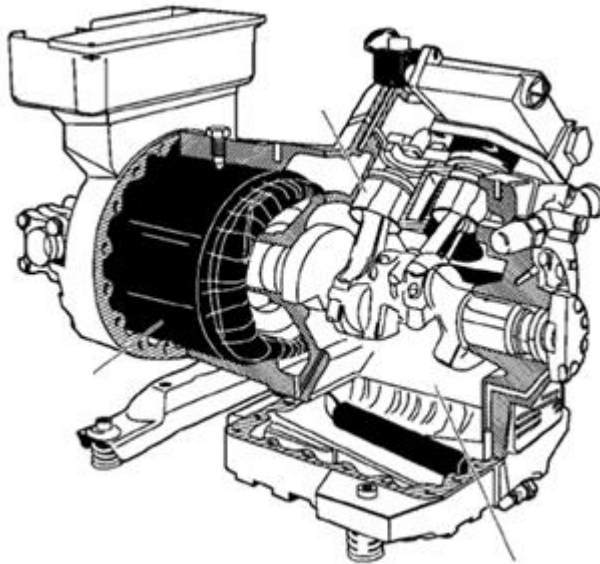



Figura 1 – Estágios de compressão compressor alternativo (DOSSAT, 2004).

3.3.8 Filtros desidratadores

Equipamento que têm como função remover a umidade do CO_2.

Equipado com:

- Válvulas automáticas;
- Sistema de regeneração a ar com aquecimento e compressor radial;
- Sistema de resfriamento com CO_2 topo do condensador;
- Purga pós-aquecimento;
- Retorno de CO_2 de resfriamento para o processo (Separador de Espuma);
- Transmissores de temperatura e pressão;
- Válvulas de segurança.

Considerações de Projeto:

- Regeneração independente dos 02 filtros;
- Controle automático do tempo de operação e posterior regeneração;
- Tempos de operações maiores;
- Economia de Energia;
- Economia de CO_2 (aquecimento com ar);
- Facilidade de Manutenção.

3.3.9 Filtros de carvão ativado

Equipamento que têm como função remover odores do CO_2 (compostos de enxofre).
Equipado com:

- Válvulas automáticas;
- Sistema de regeneração a ar com aquecimento e compressor radial;
- Sistema de resfriamento com CO_2 topo do condensador (gases inertes);
- Purga pós-aquecimento;
- Retorno de CO_2 de resfriamento para o processo (Separador de espuma);
- Transmissores de temperatura e pressão
- Válvulas de segurança
- Filtros de partículas.

Considerações de Projeto:

- Regeneração independente dos 02 filtros;
- Controle automático do tempo de operação e posterior regeneração;

- Tempos de operações maiores;
- Economia de Energia;
- Economia de CO_2 (aquecimento com ar);
- Facilidade de Manutenção.

3.3.10 Condensador de CO_2

O gás CO_2 proveniente dos filtros desidratadores passa pelo “Reboiler” (refervedor), ou evaporador, da unidade de purificação onde é resfriado antes de seguir para o condensador de CO_2 da planta de CO_2, e neste último sua maior parte é condensada (tubos) a uma temperatura entre –25°C e –30°C, dependendo da pressão de trabalho da unidade, utilizando-se como meio refrigerante NH_3 (casco) que possui pressão e temperatura controladas pelo sistema de refrigeração da usina de CO_2 existente.

A injeção de NH_3 no condensador (casco) é feita através de uma válvula, tendo sua abertura/fechamento controlado por um transmissor de nível. A expansão do refrigerante NH_3 ocorre através de válvula piloto ou redutora (agulha), sendo seu ajuste efetuado durante o comissionamento e de acordo com a pressão nominal na descarga do compressor de NH_3 e o volume de líquido a ser injetado.

O condensado proveniente do condensador de CO_2 é levado, através de gravidade para o tanque de refluxo.

A inclinação do vaso (5%) permite o acúmulo dos gases inertes provenientes do sistema de purificação no seu ponto mais alto, facilitando a purga dos mesmos e que será controlada por um transmissor.

Equipado com:

- Sistema automático de injeção e controle de nível de NH_3;
- Válvulas de bloqueio;
- Transmissor de pressão (CO_2);
- Válvulas de segurança;
- Dreno de óleo do lado casco (NH_3);
- Válvulas de dreno;
- Analisador de pureza para purga automática do CO_2;
- Medidor de vazão para purga/regeneração.

3.3.11 Unidade de Purificação

Com o objetivo de garantir a maior pureza possível do CO_2 pela remoção do oxigênio e nitrogênio, a planta é fornecida com a opção de um sistema de purificação com capacidade nominal de 1.000 kg/h.

O gás CO_2 proveniente dos filtros desidratadores passa pelo refeverdor, ou evaporador, da unidade de purificação onde é resfriado antes de seguir para o condensador de CO_2 da planta de CO_2, e neste último sua maior parte é condensada a uma temperatura entre –25°C e –30°C, dependendo da pressão de trabalho da unidade.

O condensado proveniente do condensador de CO_2 é levado, através de gravidade para o tanque de refluxo que tem seu nível indicado por um transmissor, e controlado por uma bomba através de um inversor de freqüência. A velocidade da bomba é proporcional ao nível dentro do tanque, que terá o CO_2 líquido transferido para o topo da coluna de destilação.

O CO_2 líquido flui pela coluna de cima para baixo, em contra fluxo do CO_2 gasoso evaporado no “Reboiler”. Esse processo destila o CO_2 líquido até sua pureza desejada. Todos os gases inertes provenientes da coluna de destilação acumulam-se no topo do condensador de CO_2, sendo posteriormente purgados automaticamente através de uma válvula, de acordo com a pureza lida no analisador de CO_2.

O CO_2 líquido proveniente do fundo do “Reboiler” (casco), altamente puro, é então levado aos tanques de estocagem por uma bomba de drenagem, tendo sua partida/parada controlada por dois sensores de níveis.

A válvula de retenção, localizada na linha de gás proveniente dos tanques de estocagem tem como função impedir a contaminação dos mesmos por gases inertes provenientes da coluna de destilação. Caso a pressão dos tanques de estocagem aumente em relação à pressão de trabalho da usina de CO_2 a válvula de retenção permitirá o retorno desses gases para o condensador de CO_2.

Devido à inexistência de equalização de pressão entre os tanques de estocagem e a usina de CO_2 recomenda-se não suprir a fábrica com CO_2 gasoso e líquido ao mesmo tempo, o que poderia acarretar em uma redução brusca da pressão interna do tanque (ENGEL, 2002).

3.3.12 Unidade de refrigeração

Tem como função liquefazer o CO_2 e controlar a pressão dos tanques de armazenagem. Projetada para operar com -35°C (sucção) e 35°C (condensação).

Equipado com:

- Compressor tipo parafuso completo;
- Fluido refrigerante NH_3;
- Reservatório de Líquido;
- Condensador a placas de NH_3;
- Válvulas de bloqueio;
- Válvulas de segurança;

Considerações de Projeto:

- Sistema integrado a automação da usina com interface única;
- Controle de velocidade e carga do compressor em função da pressão do CO_2 no condensador;
- Consumo de energia reduzido;
- Dimensionado para controlar a pressão do tanque.

3.3.13 Economizer

Evaporador de CO_2 inundado do tipo casco/tubo, trabalhando como pré-condensador de CO_2, usando o calor do CO_2 gasoso proveniente da usina. Este equipamento trabalha em função do diferencial de temperatura/pressão do CO_2 a ser evaporado (casco) e a ser condensado (tubo). O sistema tem um controle de nível de CO_2 para injeção de CO_2 liquido e na saída um controle de pressão, além de válvulas manuais para bloqueio e válvulas de segurança. Para o correto funcionamento deste sistema é necessário um diferencial de pressão entre condensação e evaporação de 4 bar.

Está incluída uma válvula de controle de pressão, que atua somente quando o “Economizer” está trabalhando com pouca vazão (by pass).

O Economizer tem a função de reduzir a carga térmica de condensação, pré condensando o CO_2. Para isso, o fluido de refrigeração utilizado é o próprio CO_2 líquido proveniente dos tanques de estocagem. A principal finalidade do sistema é reduzir significativamente o trabalho dos compressores de frio, acarretando em redução do consumo de energia. Utilizando-se do CO_2 líquido dos tanques no Economizer, têm-se ganhos na reevaporação do CO_2 para consumo, pois os evaporadores estarão apenas aquecendo o CO_2 gás, e não mais evaporando.

Sua eficiência será diretamente proporcional à razão produção x consumo, ou seja, deverá existir um equilíbrio entre os dois fatores citados (ENGEL, 2002).

Vejamos as condições de trabalho do equipamento:

- Razão de 1 x 1: máxima eficiência de condensação (tubos)/evaporação (casco), que pode chegar a 85% de liquefação do CO_2 nos tubos. Injeção constante de CO_2 líquido proveniente dos tanques de estocagem (casco) através da válvula LCV (diferencial de pressão);
- Baixa produção x alto consumo: redução na eficiência de evaporação, havendo necessidade de injeção de CO_2 líquido diretamente dos tanques de estocagem nos evaporadores;
- Alta produção x baixo consumo: redução na eficiência de condensação, que deverá ser suprida pelos compressores de refrigeração, havendo, portanto um aumento no consumo de energia elétrica (ENGEL, 2002).

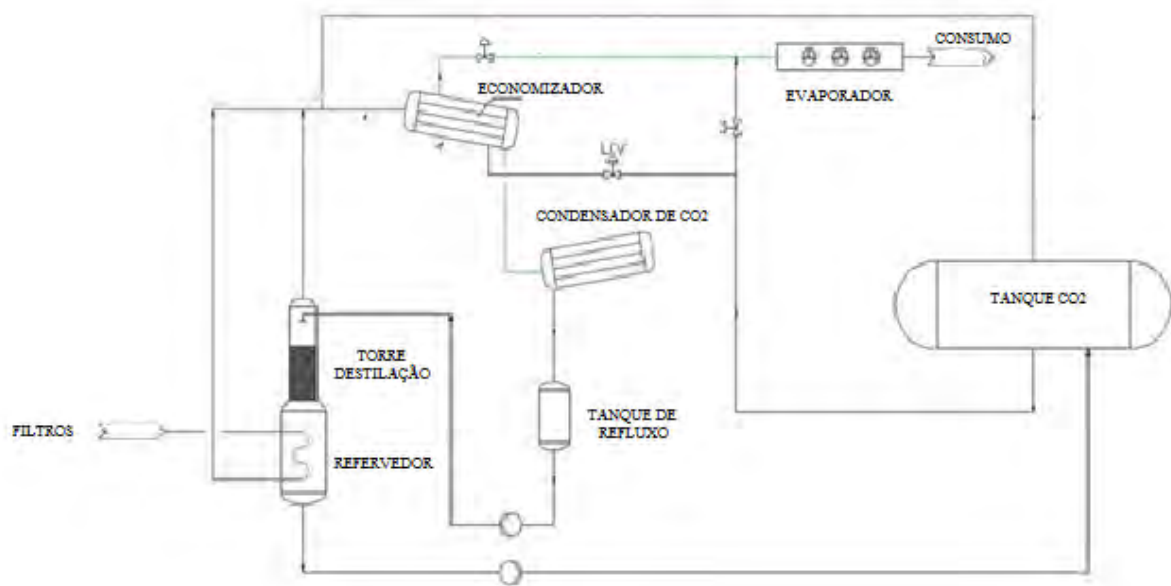



Figura 2 – Sistema economizer integrado a usina de CO_2

Fonte: Union Engenharia Ltda. – Estância-Se – 2011

3.4 Plano de manutenção

A correta manutenção da usina de tratamento de gás carbônico sem duvida alguma é o ponto diferencial para garantir que a planta opere com grande eficiência.

Segue em anexo plano de manutenção da usina, que tem por finalidade aumentar gradativamente a vida útil dos equipamentos.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas a Lei da conservação da Massa e da Espécie, a Primeira e a Segunda Lei da Termodinâmica e o conceito de exergia, uma vez que são ferramentas essenciais para a determinação dos balanços de massa e de energia, no cálculo das eficiência e irreversibilidades dos processos. É apresentado também a ferramenta que servirá na avaliação da viabilidade e do retorno do capital investido.

4.2 Conservação da massa, da espécie e a 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica

Energia é um conceito fundamental em termodinâmica e um dos mais significativos aspectos das análises em engenharia. Neste capítulo serão apresentadas as equações para aplicar o princípio da conservação da energia e definição de eficiência em nosso sistema.

4.2.1 Lei da conservação da massa

A equação da lei da conservação da massa é escrita da seguinte forma

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \qquad (4.1)$$

Onde,

m_{vc} − Massa total do volume de controle;

$\dot{m}_e$ − Fluxo de massa que entra no volume de controle;

$\dot{m}_s$ – Fluxo de massa que sai do volume de controle.

4.2.2 Primeira lei da termodinâmica

A equação da primeira lei da termodinâmica para um volume de controle qualquer com diversos fluxos mássicos é dada por:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum m_e . h_e^t - \sum m_s . h_s^t + \sum \dot{Q}_{vc,j} - \dot{W}_{vc} \quad (4.2)$$

Onde,

E_{vc} – Energia do volume de controle;

$\dot{Q}_{vc}$ – Taxa de transferência de calor na superfície do volume de controle;

$\dot{W}_{vc}$ - Taxa líquida de realização de trabalho na superfície de controle.

4.2.3 Segunda lei da termodinâmica

A equação da segunda lei da termodinâmica para um volume de controle em que a taxa de transferência de calor é total representada pelo somatório das várias taxas transferidas de reservatórios que apresentam temperaturas diferentes onde existem múltiplas correntes de fluxo (que podem entrar ou sair do volume de controle), é dada por:

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum m_e . s_e - \sum m_s . s_s + \sum_j \frac{\dot{Q}_{vc,j}}{T_j} - \dot{S}_{ger,vc} \quad (4.3)$$

Onde,

S_{vc} – Entropia total do volume de controle;

s_e - Entropia específica da substância na entrada do volume de controle;

s_s - Entropia específica da substância na saída do volume de controle.

4.2.4 O conceito de Irreversibilidade

Um processo é considerado irreversível quando, um sistema e suas vizinhanças, sofrerem transformações termodinâmicas e não puderem retornar ao seu estado original. Um processo é considerado reversível quando após transformações termodinâmicas consegue restaurar seu estado original seus sistemas e vizinhanças. Num sistema irreversível que são os que mais ocorrem nos processos naturais, podemos retornarão seu estado original após transformação, desde que sua vizinhança seja alterada, assim conseguimos fazer um sistema funcionar à medida que lhe fornecemos trabalho ou calor. A irreversibilidade é definida como a diferença entre o trabalho reversível e o trabalho real, ou seja,

$$\dot{I}_{vc} = \dot{W}_{vc}^{rev} - \dot{W}_{vc}^{real} \qquad (4.4)$$

A irreversibilidade é uma medida da ineficiência de um processo real, pois quanto menor for o trabalho real produzido, para uma dada mudança de estado, maior será a irreversibilidade. A irreversibilidade será somente nula quando o processo for totalmente reversível e será positiva para os outros processos.

Outra forma de calcular a irreversibilidade é pelo teorema de Gouy-Stodola onde usamos a geração de entropia e temperatura ambiente no cálculo desta variável.

$$\dot{I}_{vc} = T_0 \dot{S}_{ger,vc} \qquad (4.5)$$

Sendo o $\dot{S}_{ger,vc}$ calculado pela Segunda Lei da Termodinâmica Eq. 4.3.

4.2.5 O conceito de Exergia

A exergia é o máximo de trabalho teórico possível de ser obtido a partir de um sistema global, composto por um sistema e o ambiente, conforme este entra em equilíbrio com o ambiente (atinge o estado morto) (MORAN; SHAPIRO, 2008).

Exergia em termos práticos seria o trabalho necessário possível que o sistema entre em equilíbrio com o ambiente. Está variável é relacionado com a irreversibilidade, pois quanto

menor a exergia do sistema maior será o trabalho reversível diminuindo a irreversibilidade. O trabalho reversível na saída de qualquer volume de controle será máximo quando este estiver com potencial químico mínimo, energia potencial mínima e velocidade desprezível, ou seja, suas condições se assemelham ao meio ambiente. Sendo assim temos

$$ex = \left(h + \frac{V^2}{2} + gZ - T_0 s\right) - (h_0 + gZ_0 - T_0 s_0) \tag{4.6}$$

Para um processo em regime permanente e admitindo que o volume de controle apresente uma seção de entrada e outra de saída, a equação do trabalho reversível por unidade de massa (referente ao fluxo escolhido), tem a seguinte forma.

$$\dot{W}_{vc}^{rev} = (h_e^t - T_0 s_e) - (h_s^t - T_0 s_s) + \sum_{j \neq 0}(1 - \frac{T_0}{T_j})\, \dot{Q}_{vc,j} \tag{4.7}$$

Didaticamente existe uma divisão da exergia que é representada em forma de diagrama como mostrado abaixo.

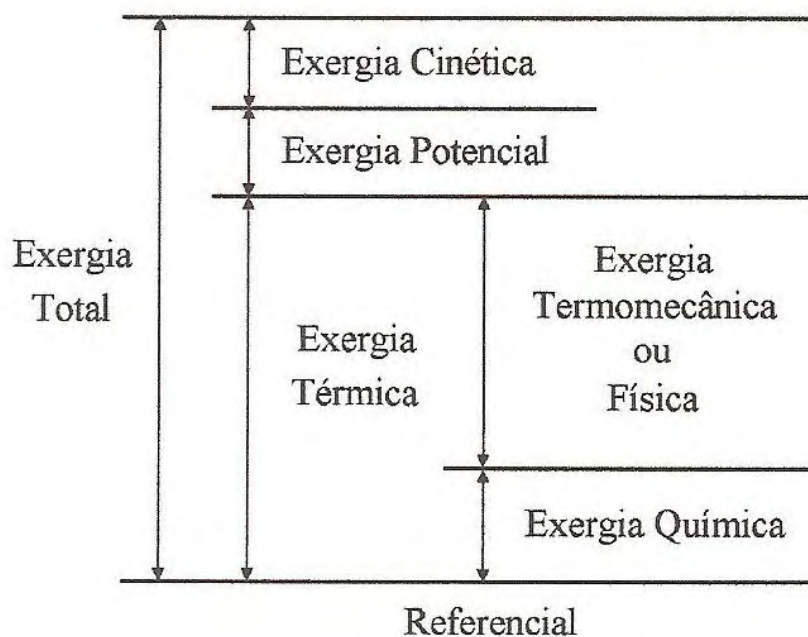



Figura 3 – Diagrama de Exergia (SOUZA, 2007) apud (TORRES, 1998).

A exergia está dividida em três partes exergia cinética, potencial e térmica. No nosso estudo iremos considerar apenas o uso da exergia térmica, ou seja, consideraremos a exergia potencial e térmica desprezíveis, temos:

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + ex^{qui} \quad (4.8)$$

A partir do conceito de exergia pode-se definir de outra forma a irreversibilidade. Sabendo-se que o trabalho reversível deve ser igual à soma da variação da disponibilidade associada ao fluido que escoa no volume de controle com trabalho reversível que pode ser extraído das máquinas térmicas reversíveis que operam entre os reservatórios térmicos, com temperatura T_j e a temperatura do meio T_0, ou seja.

$$\dot{W}_{vc}^{rev} = (\sum \dot{m}_e ex_e - \sum \dot{m}_s ex_s) + \sum (1 - \frac{T_0}{T_j})\, \dot{Q}_{vc,j} \quad (4.9)$$

Sendo assim temos a irreversibilidade como:

$$\dot{I}_{vc} = \dot{W}_{vc}^{rev} - \dot{W}_{vc}^{real} \quad (4.10)$$

4.5 Eficiências

A eficiência de um equipamento é à medida que mostra o quanto do potencial teórico total do sistema estamos usando, ou seja, seu desempenho.

4.5.1 Eficiência de Primeira Lei

A eficiência do ponto de vista da primeira Lei da Termodinâmica, ou eficiência energética, corresponde à comparação entre duas quantidades energéticas, que relacionam a energia efetivamente útil e a energia disponibilizada ao sistema térmico, ou seja (SOUZA, 2007)

$$\eta = \frac{Energia \quad útil}{Energia \quad disponibilizada} \quad (4.12)$$

Como a primeira lei não engloba as perdas por irreversibilidades, seu princípio básico é que a energia se conserva então teremos resultados que não são confiáveis.

4.5.2 Eficiência de Segunda Lei

A eficiência pela Segunda Lei da Termodinâmica (também chamada de eficácia ou eficiência exegética) é uma relação entre exergias, desta forma, espelha melhor o aproveitamento da energia no sistema térmico, uma vez que toda exergia pode, teoricamente, ser utilizável (SOUZA, 2007).

$$\varepsilon = \frac{Exergia \;\; dos \;\; produtos}{Exergia \;\; dos \;\; insumos} \qquad (4.13)$$

Está eficiência nos mostra um valor mais real a respeito do desempenho dos equipamentos do ciclo.

4.6 Definição dos volumes de controle

A definição dos volumes de controles para o processo de desidratação foi delineado para que todos os componentes fossem envolvidos, permitindo contornar os problemas, pela aplicação dos balanços de massa, espécie e de energia, da ausência de dados de medições e na literatura para alguns pontos dos ciclos.

Traçados os objetivos a serem atingidos, os volumes de controle escolhidos foram:

- Trocador de calor água-CO_2 (Resfriador);
- Trocador de calor Amônia-CO_2 (Desumidificador).

4.7 Aplicação das Leis de Conservação nos volumes de controle do processo de desidratação do CO_2

Conjunto de restrições adotados na análise do processo:

- O estado da substância, cada ponto do volume de controle, não varia com o tempo (regime permanente);
- O fluxo de massa e o estado dessa massa em cada área discreta de escoamento na superfície de controle não variam com o tempo. As taxas nas quais o calor e o trabalho cruzam a superfície de controle permanecem constante;

- As variações de energia potencial e cinética são desprezíveis para todos os processos analisados;
- Não há realização de trabalho no ciclo;
- O volume de controle de cada componente envolve apenas os fluidos de trabalho de entrada e saída;
- Desprezadas as perdas de carga na tubulação;

4.8 Custo monetário

Qualquer projeto de investimento possui de inicio um período de despesas (em investimento) a que se segue um período de receitas liquidas(liquidas dos custos do exercício). As receitas recuperam o capital investido. O período de tempo necessário para as receitas recuperam a despesa em investimento é o período de recuperação. *Payback* é o tempo decorrido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado se iguala ao valor desse investimento.

Algebricamente tem-se:

$$PR = T quando \sum_{t=0}^{T} CF_t = I_0$$

Sendo:

- PR= Período de Recuperação
- CFt= Fluxo de caixa total no ano t
- I_O= Fluxo de caixa do investimento Inicial

Vantagens do método *Payback*:

- Fornece uma idéia do grau de liquidez e de risco do projeto;
- Em tempo de grande instabilidade e pela razão anterior, a utilização deste método é uma forma de aumentar a segurança dos negócios da empresa;
- Adequado à avaliação de projetos em contexto de risco elevado;
- Adequado à avaliação de projetos com vida limitada.

5 METODOLOGIA

Este capítulo tem o objetivo avaliar as ferramentas necessárias na construção do presente projeto e os recursos para atender o escopo do projeto.

5.1 Métodos e Classificação do Projeto

Foi utilizado como método de pesquisa dois estudos de caso, que permite analisar fenômenos decorrente na mudança de *layout* e parâmetros operacionais, conduzindo o investigador a concentrar-se em aspectos ou situações específicas na tentativa de identificar, os diversos processos de interação no assunto estudado.

Os dados de entrada do processo foram coletados no campo e serão mostrado nessa seção separados por equipamento. Segue abaixo dados necessários para cálculo de eficiência termodinâmica nos trocadores de calor analisados.

Tabela 3 – Dados do resfriador

Dados	**Valor**
Pressão entrada CO_2	17 bar
Pressão saída CO_2	17 bar
Temperatura entrada CO_2	115 °C
Temperatura saída CO_2	31 °C
Pressão entrada água	4 bar
Pressão saída água	4 bar
Temperatura entrada água	25 °C
Temperatura saída água	50 °C

Tabela 4 – Dados conhecidos do desumidificador

Dados	Valor
Pressão entrada CO_2	17 bar
Pressão saída CO_2	17 bar
Temperatura de entrada CO_2	31 °C
Temperatura de saída CO_2	10 °C
Pressão entrada NH_3	3 bar
Pressão saída NH_3	3bar
Temperatura de entrada NH_3	-30 °C

5.2 Universo e Amostra

Conforme as necessidades deste projeto, o universo da pesquisa foi realizado na usina de tratamento de gás carbônico da planta da Companhia de bebidas das Américas (ambev) e teve suporte técnico dos funcionários do setor de utilidades e do Centro de Engenharia da Companhia (CENG).

5.3 Instrumentos de Coleta de Dados

O estudo foi realizado através das análises de parâmetros do funcionamento da planta de CO_2 em condições ideais e em condições não favoráveis, as alterações sistêmicas testadas também auxiliaram gerando novos parâmetros de análises, além disso, foi utilizada a técnica de observação no intuído de possibilitar maior entendimento na realização do projeto.

5.4 Plano de Análise de Dados

Para tratamento dos dados do presente estudo será utilizada, valores referentes obtidos nas análises termodinâmica dos trocadores, análise comparativa onde o parâmetro coletado no campo nos possibilitará chegar a números que represente a eficiência do nosso equipamento gargalo, sendo possível assim, simular situações ótimas de funcionamento desse equipamento e propor melhorias consistentes no processo estudado.

6 ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UMA USINA DE CO_2

6.1 Introdução

Neste capítulo serão analisados e interpretados os dados obtidos no projeto realizado na Companhia de Bebidas das Américas, tendo como ponto crítico a entrada do CO_2 úmido no equipamento evaporador de CO_2 da unidade de purificação (Reboiler), todos os equipamentos antes desse resfriador e após a descarga dos compressores, foram minuciosamente analisados no intuito de chegar ao ponto específico que necessita de ajuste, mudança de parâmetros ou até mesmo alteração no projeto inicial.

O fato de haver umidade no gás que chega a serpentina do Reboiler e troca calor com o CO_2 líquido, que se encontra do lado do casco no trocador, leva ao congelamento dos tubos, devido elevada temperatura de orvalho da água comparado ao do CO_2 puro. Em virtude da temperatura dentro do reboliler variar entre -25°C a -30°C, a água que passa arrastada com CO_2 automaticamente altera seu estado gasoso para o estado sólido, assim camadas de gelo vão se formando no interior da serpentina até um ponto em que os tubos encontram-se todos obstruídos, impedindo dessa forma a passagem do CO_2. Como conseqüência do congelamento do reboiler, ocorre uma elevação instantânea da pressão no sistema anterior a esse equipamento, com isso o compressor por medida de segurança é desabilitado automaticamente, desligando em seqüência a usina por inteiro.

Os equipamentos analisados nesse projeto de otimização foram aqueles cuja função é de retirar umidade do CO_2, fator observado como crítico e eliminador de anomalia na elaboração da pesquisa.

Sendo assim podemos dividir as etapas analisadas em:

- Trocador de calor casco tubo (Primeiro resfriamento do gás)
- Desumidificador (Trocador casco tubo refrigerado por amônia)
- Secador (Filtro adsorvedor por alumina)

A descrição do funcionamento do ciclo de desidratação da usina de CO_2, pode ser encontrada na literatura (ENGEL, 2002). Para facilitar o entendimento do princípio de

operação deste processo, adotamos o fluxograma do sistema, Fig. (4), como ponto de referência para análises.

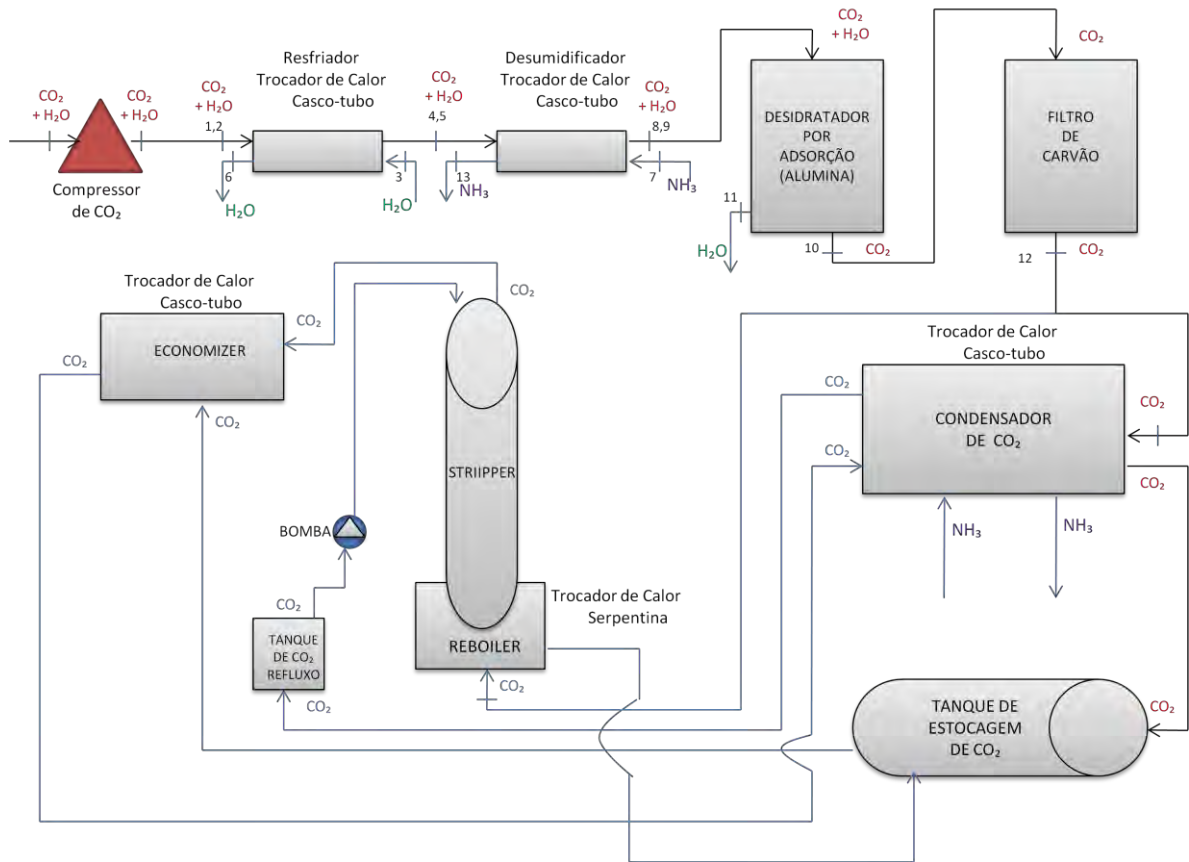



Figura 4: Fluxograma do sistema de desidratação e purificação da usina de CO_2.

Após o CO_2 ter acesso a usina de beneficiamento, ter sido lavado e comprimido, segue em sentido a desidratação. Os pontos (1,2) representam a etapa inicial de desidratação do gás úmido, nesses pontos temos vapor de água misturado ao CO_2 gás. O resfriamento do gás no resfriador é feito utilizando a água como fluido refrigerante, os pontos (3,6) representam entrada e saída do fluido no trocador de calor respectivamente. No segundo trocador de calor do sistema, desumidificador, parte do vapor de água presente no gás em desidratação (4,5) é condensado e drenado através de um purgador do tipo bóia, a proporção de água ainda presente no gás é representado pelo ponto (9), o CO_2 gás na saída do desumidificador é indicado pelo ponto (8). O filtro desidratador por alumina é a última etapa de desidratação do gás, em condições de funcionamento ideal da usina praticamente toda água presente no gás é retirada pelo ponto (11) e o CO_2 desidratado segue para purificação conforme orientação do ponto (10).

6.2 Trocador de calor casco-tubo

Uma das aplicações da transmissão de calor é o estudo dos transmissores de calor, elementos comuns a qualquer tipo de indústria.

O transmissor de calor é um aparelho que se propõe a transmitir calor entre dois sistemas (fluído quente e fluído frio). Esta transmissão pode ser feita através de elementos que separam os sistemas ou diretamente misturados os componentes (JUNIOR, 2001).

Esse equipamento, conforme citado acima, é o primeiro responsável pelo resfriamento do gás, que apresenta aproximadamente 10% de umidade. Sua função no sistema é baixar a temperatura do gás de 115° C, temperatura da descarga do segundo estágio do compressor de CO_2 em condições normais de operação, para um valor próximo a 31° C (nesse equipamento não é retirado umidade).

Apesar dos equipamentos medidores de temperatura indicarem valores bem próximos ao esperado, na saída do gás no trocador de calor, foi decidido abrir o equipamento e verificar calibração do equipamento de medição de temperatura, com isso foi possível também realizar teste de estanqueidade nos tubos do trocador. Foi verificado que o trocador estava em excelente estado de funcionamento sem incorporação de água nos tubos. Apesar da pressão da água de resfriamento (3 bar) ser bem inferior ao do gás (17 bar) e nessas condições ser impossível que se passe água para dentro dos tubos preenchidos pelos gases, a incorporação poderia ocorrer no momento em que a planta parasse e houvesse despressurizarão do sistema.

Figura 5 **:** Tubos do trocador de calor casco-tubo

Com a análise termodinâmica (apêndice) foi constatado que a eficiência do trocador gira em torno de 52%. O valor de eficiência não é maior em virtude das grossas camadas de aço

dos tubos do trocador, que tem por finalidade evitar o máximo a possibilidade de incorporação de água no gás comprimido.

6.3 Desumidificador

A função do desumidificador é fazer uma pré-desidratação do gás, ou seja, retirar parte da água que se encontra misturado com o CO2. Os parâmetros ideais para que essa pré-desidratação ocorra da maneira mais eficiente possível depende das condições de pressão e temperatura vinda do primeiro resfriador citado na sessão 6.1.

Conforme avaliado na inspeção do resfriador, podemos garantir que os gases na entrada do desumidificador encontram-se nos parâmetros ideais de funcionamento.

Conforme catálogo do fabricante da usina, a temperatura de entrada do gás no desumidificador deve ser igual ao da saída do resfriador 31°C, temperatura de saída deve estar dentro da faixa de 10 a 8°C e na mesma pressão de entrada.

O primeiro ponto de verificação nesse equipamento foi à calibração dos instrumentos de medições de temperatura e pressão, com a calibração desses as indicações permaneceram as mesmas, ou seja, não havia erro nas leituras tanto de pressão como de temperatura do equipamento.

O segundo ponto verificado foi o funcionamento do purgador de água do desumidificador. O purgador do tipo bóia permite a passagem de líquido quando o mesmo chegar ao nível de abertura da bóia, nesse ponto é que desidratamos o gás retirando a água condensada. O funcionamento do purgador conforme análises de dois instrumentistas estavam dentro do recomendado, ou seja, a água condensada estava sendo eliminada com eficiência.

Terceiro ponto analisado foi estanqueidade do trocador, para que isso fosse possível foi necessário despressurizarão do trecho resfriado por amônia e retirado dos parafusos do flange do trocador. Depois de sacado o trocador foi possível injetar água por dentro dos tubos e verificar que não existem furos nem trincas que permite a passagem de amônia do lado do casco para o interno dos tubos. Não havendo incorporação de amônia nos tubos podemos com isso certificar que o gás que sai do desumidificador esta corretamente dentro dos parâmetros ideal de funcionamento.

Quarto ponto avaliado foi a certificação da correta eliminação do ar presente no sistema. O ar presente no sistema dificulta a troca térmica entre os fluidos devido o ar ser o mais eficiente isolante térmico que existe. Como valores típicos do coeficiente de convecção externo, tem-se 7,0 kcal/h.m2.ºC para o ar parado e até 35 kcal/h.m2.ºC para o ar com

velocidade próxima de 20 km/h. O coeficiente de convecção interno, que também depende da movimentação do ar dentro da câmara, varia de 7,0 a 15,0 kcal/h.m2.ºC. Os valores da condutividade térmica dos materiais construtivos das câmaras pode ser obtido de tabelas ou, para o caso dos isolantes, de dados do fabricante (VENTURINE, 2005).

As propriedades mecânicas de um isolamento variam com a composição básica, densidade, diâmetro da fibra e orientação, tipo e quantidade de material fibroso que aumenta o poder de coesão (se existir), e com a temperatura à qual é realizada a avaliação (KREITH, 2007).

A análise termodinâmica (anexo) do desumidificador aponta uma eficiência próxima a 81% para o trocador. O valor encontrado de eficiência confirma o perfeito estado de operabilidade do equipamento como verificado em análise de campo.

6.4 Secador

O equipamento da usina especificamente responsável pela desidratação do gás são os filtros secadores. Sem sombra de dúvidas é nele que se deve dedicar maior atenção nesse trabalho.

O princípio de funcionamento desse equipamento tem como elemento adsorvedor de umidade a alumina. Dois filtros, com volume interno dos tanques de 1,5 m³ completamente preenchidos por alumina, trabalham de maneira alternada, na maneira que um filtro satura suas resinas com umidade o outro filtro entra em operação para que o outro possa ser regenerado. Segue o ciclo de regeneração dos filtros secadores que impreterivelmente deve ser obedecido.

Figura 6: Filtros Secadores

Fonte: Usina Union Engenharia

6.4.1 Ciclo de regeneração

Os dois filtros desidratadores estão em operação / regeneração de acordo com um ciclo de 48 horas de produção definidas de acordo com a capacidade dos compressores de CO2:

- Usina a 50% de sua capacidade: serão contados 02 minutos corridos para cada minuto de operação do filtro;
- Usina a 100%: cada minuto corrido será considerado como 01 minuto de operação do filtro.

Sempre haverá um filtro em operação e outro em regeneração.

Caso durante a regeneração do filtro ocorrer uma falta de energia, parada de emergência ou qualquer alarme de regeneração, o mesmo continuará seu ciclo do ponto onde se encontrava anteriormente assim que a energia retornar e os alarmes forem eliminados.

Alarmes referentes ao período de regeneração não permitirão a contagem regressiva do tempo da mesma até que o problema seja resolvido e os alarmes eliminados.

Os filtros de carvão ativado seguem o seguinte ciclo de operação/regeneração:

- Operação 24 horas de produção ou 720 horas de usina inoperante.
- Operação Paralela 60 segundos.
- Despressurizarão 30 minutos.
- Aquecimento 220 a 720 minutos.
- Resfriamento com ar 15 minutos.
- Resfriamento CO2 1 30 minutos.
- Resfriamento CO2 2 300 a 600 minutos.
- Pressurização 45 minutos
- Stand by Até que o filtro saia de operação.

6.4.2 Pontos de intervenções

A seguir serão relatados os pontos nos quais foram analisados o secador.

6.4.2.1 Instrumentos de medição

O primeiro ponto monitorado nesse equipamento foi às calibrações de seus instrumentos. Aproveitando o dia de inventario da fábrica em que houve corte de água para todas as áreas, foram retirados todos os instrumentos utilizados nesse equipamento como válvula automática, válvula de segurança e transmissores de pressão e temperatura, conferindo assim a calibração dos mesmos. Conforme orientado pelo plano de calibração dessas válvulas e transmissores todos esses instrumentos estavam em seu período correto de calibração e em perfeita condições de funcionamento.

6.4.2.2 Agente adsorvedor

O segundo ponto monitorado e de fundamental importância para atingimento do parâmetro necessário, ponto de orvalho do gás igual a -60°C é a alumina utilizada para adsorção. Em contato direto com o fabricante do equipamento, empresa dinamarquesa Union, foi relatado pelos seus técnicos à existência de uma alumina com o poder de adsorção de líquido um pouco maior da que estávamos usando atualmente. Segue abaixo característica desse produto:

Informações sobre a Alumina F-200.

F-200 é uma esfera lisa de carvão activado alumina produzida pela Almatis ' exclusivo processo de fabricação, e está disponível em uma variedade de tamanhos. F-200 é uma excelente dessecante para secagem de uma ampla variedade de líquidos e gases. Apesar de todas as moléculas são adsorvido em certa medida, F-200, essas moléculas tendo a maior polaridade são preferencialmente adsorvidas. Condições de fluxo, tais como pressão, concentração e peso molecular das moléculas, temperatura e site moléculas concorrentes afetam o eficiência de adsorção.

Benefícios do produto.

1. Uniforme tamanho de uma bola. Esta propriedade é especialmente útil em alta pressão desidratação de gás, onde a minimização queda de pressão é importante. O uniforme tamanho e esfericidade da F-200 impedem a segregação adsorvente durante o carregamento pneumático, assim minimizando canalização e rendendo utilização mais eficiente de toda a torre dessecante.

2. Alta resistência ao esmagamento. F-200 tem uma alta resistência ao esmagamento que permite carregamento pneumático rápida de torres. A resistência ao esmagamento de alta também permite utilização de torres mais altas que fazem mais utilização eficiente do dessecante. F-200 alumina ativada é altamente resistente a amina ataque. Além disso, F-200 de alta resistência ao esmagamento permite para desidratar o ácido contendo gases e líquidos, tais como o CO_2, por uma vida útil mais longa.

3. Baixa abrasão. A baixa abrasão da F-200 garante menos pó durante vida, transporte, carregamento e serviços que reduz a queda de pressão e minimiza a válvula a jusante e entupimento do filtro, comum com empoeirado produtos.

4. Alta capacidade de adsorção. F-200 de elevada área superficial e poros sob medida distribuição de proporcionar uma elevada dinâmica H_2O capacidade de adsorção. Com projeto de torre correta e eficaz regeneração, F-200 pode atingir um

especificação H_2O baixíssimo efluentes (isto é, do ponto de orvalho). F-200 também tem excelente estabilidade cíclica que rende uma maior vida útil.

A substituição da alumina foi o primeiro parâmetro do projeto que poderia ser modificado que apresentasse ganho real ao sistema. No dia 25/05/2011 a alumina F-200 foi substituída no sistema.

O primeiro passo apos substituição da alumina foi alinhar o striper para operação. A planta dessa vez operou 4 dias até que os tubos da serpentina do Reboiler congelassem. Foi notado que o tempo de congelamento havia aumentado em relação ao tempo de funcionamento com a utilização da outra alumina que possuía características bem similares.

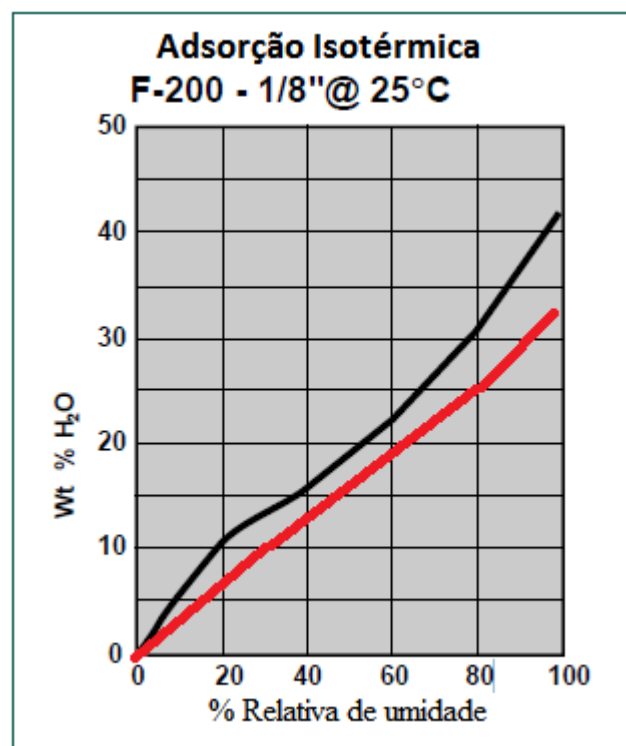



Figura 7: Gráfico relativo á % de umidade x % em peso de água adsorvida.(Usina 1200 kg/h)

Fonte: Union Engenharia

O gráfico visto na figura 6, ilustra um leve poder de adsorção da alumina F-200 (linha preta), frente a atual alumina utilizada na usina (linha vermelha). Porém, conforme definido acima, somente o fato de substituir a atual alumina por uma que apresente um maior poder de adsorção de água, tendo como entrada gases com 20% de umidade relativa, não resolveria a anomalia da usina e não possibilitaria a operação do sistema de purificação.

6.4.2.3 Filtros secadores

Como visto anteriormente o último equipamento da usina responsável por retirar umidade presente do gás, incorporado durante lavagem do gás nas torres de pré e pós lavagem, são os filtros secadores.

O primeiro passo dado no intuito de verificar as condições de operação dos filtros foi solicitar ao fabricante do equipamento dados que contemplassem a capacidade máxima, em toneladas hora, que o equipamento trabalhasse em sua melhor eficiência. O valor repassado pela Union Engenharia foi de fundamental importância para entendimento da anomalia. De acordo com os catálogos apresentados a capacidade na qual os filtros foram dimensionados para trabalharem foi em usina com capacidade de 1200 kg/h de CO_2 bruto.

Foi chegado que após entrar em operação a usina da ambev Sergipe passou por uma ampliação na capacidade de beneficiamento com a instalação de mais um compressor que possuía capacidade volumétrica de 300 kg/h de CO_2.

Seguindo a ordem cronológica das ações, após sofrer aumento na capacidade volumétrica de CO_2 passando de 1200 kg/h para 1500 kg/h o único equipamento da usina que perdeu em eficiência foi os secadores, todos os demais equipamentos eram projetados para sofrerem essas alterações.

A baixa eficiência desse equipamento foi evidenciada após a compra do sistema de purificação (striper), pois anterior a isso a condensação do CO_2 ocorria toda no condensador, aonde a temperatura chega próximo a -25°C e o diâmetro dos tubos são mais largos do que os da serpentina do reboiller. Com a utilização do stripper a temperatura em que o CO_2 é condensado ocorre na faixa de -30°C a -35°C e os tubos da serpentina são bem inferiores ao do condensador tradicional.

Com todo esse levantamento das condições atuais de funcionamento e variações do projeto inicial da usina foi possível observar que todo problema de congelamento do sistema de condensação possivelmente ocorria em virtude do sub-dimensionamento dos filtros secadores por alumina da planta de CO_2.

Foi solicitada a gerência fabril da unidade a visita do fabricante do equipamento para análise dos fatos e parecer técnico dos especialistas. Segundo especialista da Union engenharia, outra planta de CO_2 da AmBev já havia apresentado essas característica no congelamento. A solução proposta nessa outra unidade foi diminuir o tempo de regeneração

dos filtros. Foi constatado em nossa unidade que o tempo de regeneração dos filtros já estava o menor possível e que a solução adequada realmente pudesse ser a substituição dos filtros.

6.5 Evolução Típica do CO_2 proveniente dos fermentadores

O gráfico abaixo define o ganho em CO_2 quando operamos a usina com o sistema de purificação.

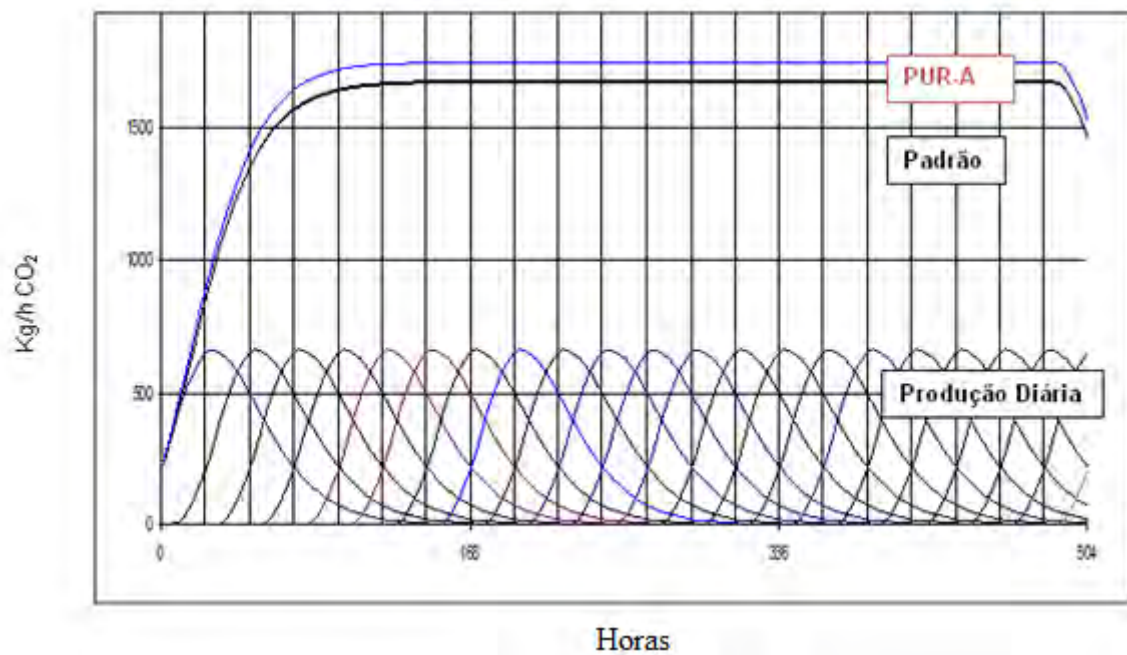



Figura 8 – Beneficiamento de CO_2 usina padrão e usina com purificação

Levando em consideração tanques fermentadores com capacidade volumétrica de 4000 hl pode-se contabilizar no final de 30 dias de fermentação, ganhos de ate 37 toneladas de CO_2.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com as análises termodinâmicas do processo, obtidos a partir de simulações no programa Engineer Equation Solver (EES), e estudo de campo do equipamento desidratador.

7.2 Análise Termodinâmica dos trocadores de calor do processo de desidratação do CO_2

O resultados obtidos da análise termodinâmica do processo de desidratação do CO_2, através do código computacional, estão mostrados na Tab. (5) e nas Figs. (8), (9) e (10).

Na tabela 5, os fluxos envolvidos no sistema e os valores da vazão ($\dot{m}$), pressão (P), temperatura (T), concentração (x), entalpia (h), entropia (s) e exergia (ex), fornecidos pelo código computacional são apresentados.

Tabela 5 Parâmetros termodinâmicos da unidade de desidratação

Ponto	Descrição dos fluxos	$\dot{m}$ (kg/s)	P (bar)	T (ºC)	x	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	ex (kJ/kg)
1	CO_2 gás entrada do resfriador	0,42	17	115	0,909	70,69	-0,3163	1566
2	Vapor de água na entrada do resfriador	0,014	17	115	0,091	483,6	1,472	1445
3	Água de resfriamento entrada do resfriador	0,553	4	25	1	105,1	0,3668	1396
4	Saída do CO_2 do resfriador e entrada do CO_2 no desumidificador	0,42	17	31	0,909	-11,07	-0,5536	1555
5	Saída de água do resfriador e entrada de água no desumidificador	0,014	17	31	0,091	131,4	0,4498	1398
6	Água de resfriamento saída do resfriador	0,553	4	50	1	1,674	0,7036	1193
7	Amônia líquida entrada do trocador	0,011	3	-20	1	108,6	0,6534	1314
8	Saída de CO_2 do desumidificador	0,42	17	10	0,909	-32	-0,625	1555
9	Água líquida saída do desumidificador	0,014	17	10	0,091	43,64	0,1508	1399
10	Saída de CO_2 do desidratador	0,042	17	10	1	43,64	0,1508	1399
11	Saída de água do desidratador	0,01	17	10		43,64	0,1508	1399
12	Saída de CO_2 do filtro de carvão	0,42	17	10		-32	-0,625	1555
13	Saída de amônia do desumidificador	0,011	3	0		1443	5,711	1140

A taxa de transferência de calor dos volumes de controle é representado pela forma gráfica na figura (8).

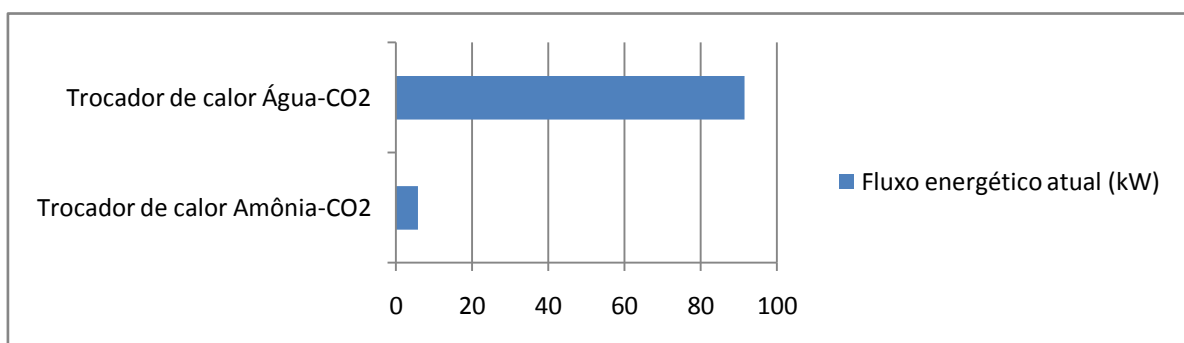



Figura 9: Fluxo energético do sistema de desidratação

Observa-se na Figura (8), que o fluxo de calor no trocador de calor água-CO_2 apresenta um valor significante, esse fato é devido ao processo de absorção que é uma reação exortérmica ter sido agravado em virtude da falta de revestimento térmico no equipamento.

Como se sabe a eficiência pela 1ª Leia da Termodinâmica, não quantifica as perdas do sistema, dessa forma a sua eficiência será sempre de 100%. A razão de sua utilização é de servir de parâmetro para montagem do equacionamento da eficiência pela 2ª Lei da Termodinâmica.

A Figura (9) mostra a eficiência da segunda Lei da Termodinâmica e o Grau de Perfeição Termodinâmico para cada trocador de calor do processo.

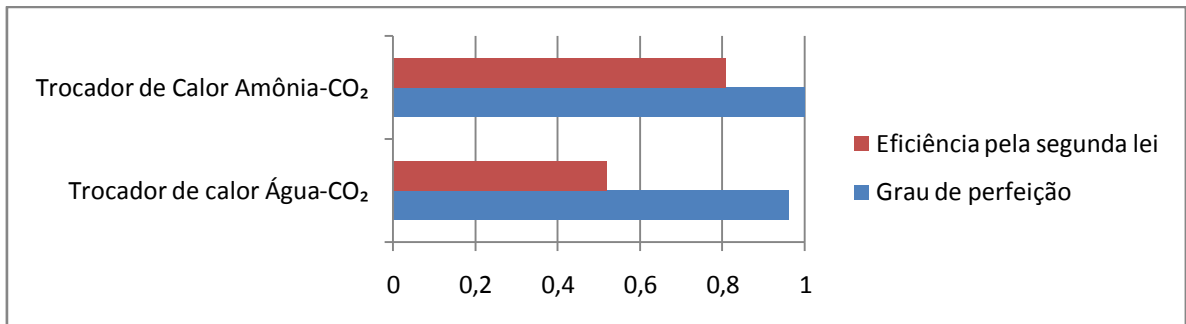



Figura 10: Eficiência pela 2ª Lei da Termodinâmica e o Grau de Perfeição Termodinâmico

O complemento da análise energética se expressa pela avaliação exergética, onde o princípio da exergia a identificação das irreversibilidades do sistema, bem como a detecção, das perdas mais pronunciadas. Estes resultados possibilitam que o investimento para melhoria do sistema seja direcionado a ponto onde a resposta será mais expressiva.

A Figura (10) mostra as irreversibilidade dos dois trocadores de calor do sistema de desidratação. Esta informação é a essência da análise através da 2ª Lei da Termodinâmica, pois informa onde ocorre as perdas do sistema.

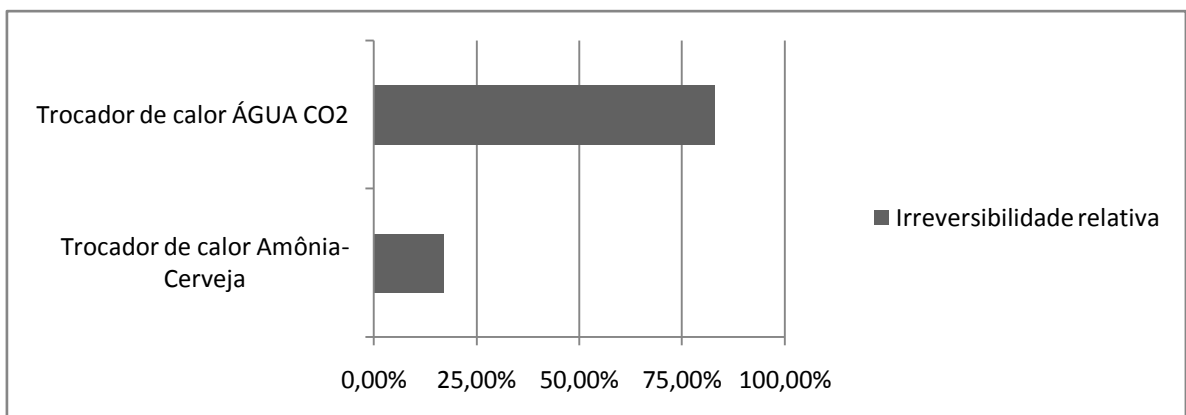



Figura 11: Irreversibilidade de cada trocador em relação a total do sistema de desidratação

O trocador de calor água-CO_2, como pode ser observado na Figura (10), é o responsável pela maior parcela da irreversibilidade gerada no processo de desidratação, devido ao não aproveitamento do calor rejeitado pelo equipamento.

Os resultados de irreversibilidades obtidos nesse trabalho indica que o trocador de calor água- CO_2 requer investimento para aquisição de revestimento térmico objetivando a melhoria do sistema.

7.3 Análise da umidade do CO_2 nos filtros desidratadores

Tendo como base a Figura (6), do tópico (6.3.2.2), foi realizado uma aproximação para uma reta dos dados do determinado gráfico no intuito de determinar a umidade atual e a umidade ideal do CO_2 na saída do desidratador (as contas encontram-se no anexo 1).

Analisando os dados, pode-se afirmar que em condições ideais de operação, segundo dados extraídos da tabela, temos que o gás que entra no desidratador com 10% de umidade relativa e sai do mesmo com umidade de 5,85%. Esse valor de 5,85%, segundo fabricante da usina de purificação, é o limite de porcentagem ideal de umidade no gás para que não ocorram congelamentos.

Os cálculos em anexo 1 apontam a umidade real do gás na saída do desidratador e entrada da unidade de purificação.

O percentual de 6,71 representa a umidade relativa do gás após passar pelo filtro desidratador, esse valor esta acima do máximo descrito pelo fabricante da unidade de purificação como máximo necessário para não ocorrência de congelamento da serpentina do refervedor.

A quantida de alumina utilizada em cada um dos dois filtro desidratador é 500 kg. Conforme visto essa quantidade de alumina não atende a atual vazão de gás carbônico beneficiado. Como o peso de alumina utilizada quando usina opera com 1200 kg/h esta próximo ao valor limite de umidade do gás na entrada da usina de purificação, a readequação do filtro para capacidade de suportar 25% a mais de alumina é uma alternativa que atenderia os parâmetros de umidade do gás na saída da usina.

7.4 Análise de viabilidade econômica

A proposta enviada pela Union engenharia, empresa fabricante do filtro desidratador , após solicitação da unidade Sergipe, contemplava o custo de aquisição e instalação do equipamento em R$ 198.000,00. Conforme calculado anteriormente o volume de gás carbônico comprado em um mês é de aproximadamente 37 toneladas. O custo do CO_2 no principal fornecedor da unidade, White Martins, gira em torno de R$ 2,15 por kg, porém a transferência de CO_2 de outra unidade da Cia. gera o custo de R$ 0,15 por kg. Com a análise de payback é verificado que o tempo de retorno do investimento pode ser de até 2,5 meses, caso o CO_2 seja comprado do fornecedor externo ou até 36 meses caso o CO_2 seja adquirido por transferência interna.

Segundo histórico de compra da unidade, temos que 70 % do gás comprado é externo. Dessa forma temos o retorno do capital investido no equipamento em 3,5 meses e um excelente atrativo financeiro para a viabilidade do projeto.

8 CONCLUSÃO

Observou-se que a ineficiência da usina de tratamento de CO_2 gera grande lacuna no estoque de suprimento da fábrica. Calculou-se que a unidade como um todo opera com 80% de eficiência, fato esse gera a necessidade de compra do gás carbônico. Seguindo o fluxo correto da análise de causa e efeito realizada pelo presente trabalho na planta de tratamento de CO_2, todos os pontos analisados como potenciais causadores da anomalia foram estudados.

Os resultados dos cálculos das eficiências termodinâmicas realizados no programa *Engineering Equation Solver* (EES), foram satisfatórios para o resfriador (52%) e para o desumidificador (80%), tendo em consideração suas características de funcionamento. A investigação da eficiência e confiabilidade no funcionamento de cada trocador de calor analisado foi o que deu credibilidade a decisão em priorizar como equipamento gargalo os filtros secadores.

A análise de funcionamento dos filtros secadores com alumina F200 foi uma relevante tentativa de reverter o percentual de água remanescente no gás desumidificado. Porém, como visto, o ganho na secagem do gás não foi suficiente para impedir o congelamento da serpentina do trocador de calor do refervedor.

Foi verificado que a maneira mais viável de secar o gás carbônico dentro das características necessárias para operação da unidade de purificação, após o projeto de ampliação da usina, seria a aquisição de mais um par de filtros secadores com as mesmas características do atual. Dessa forma a usina passaria a operar com um par de filtros por vez.

A análise de viabilidade econômica do projeto, mostra um retorno em 3,5 meses para do capital investido na readequação da usina, levando em consideração que na atual situação 70% da compra do fluido tem como origem fornecedores externos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Energia e primeira e segunda lei da termodinâmica. Disponíel em: <http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/textos/apostila2.htm> Acesso em 08/07/2011.

Propriedades gerais do CO_2. Disponível em: <http://albertopitanga.blogspot.com/2008/11/propriedades-fsicas-do-co2.html>Acesso em 15/05/2011

JUNIOR, L. C. M; Coeficiente global de transferência de calor, Transferência de Calor; São Paulo; 2001

KREITH, F. Princípios de Transmissão de Calor. Edgard Blücher; São Paulo; 1997

VENTURINE, O. J; Eficiência Energética em Sistema de Refrigeração Industrial e Comercial; Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

ENGEL, L.Treinamento Operacional para Usina de Recuperação de CO_2 com Economizer**.** 1. Ed. .rev. Curitiba. 2002.

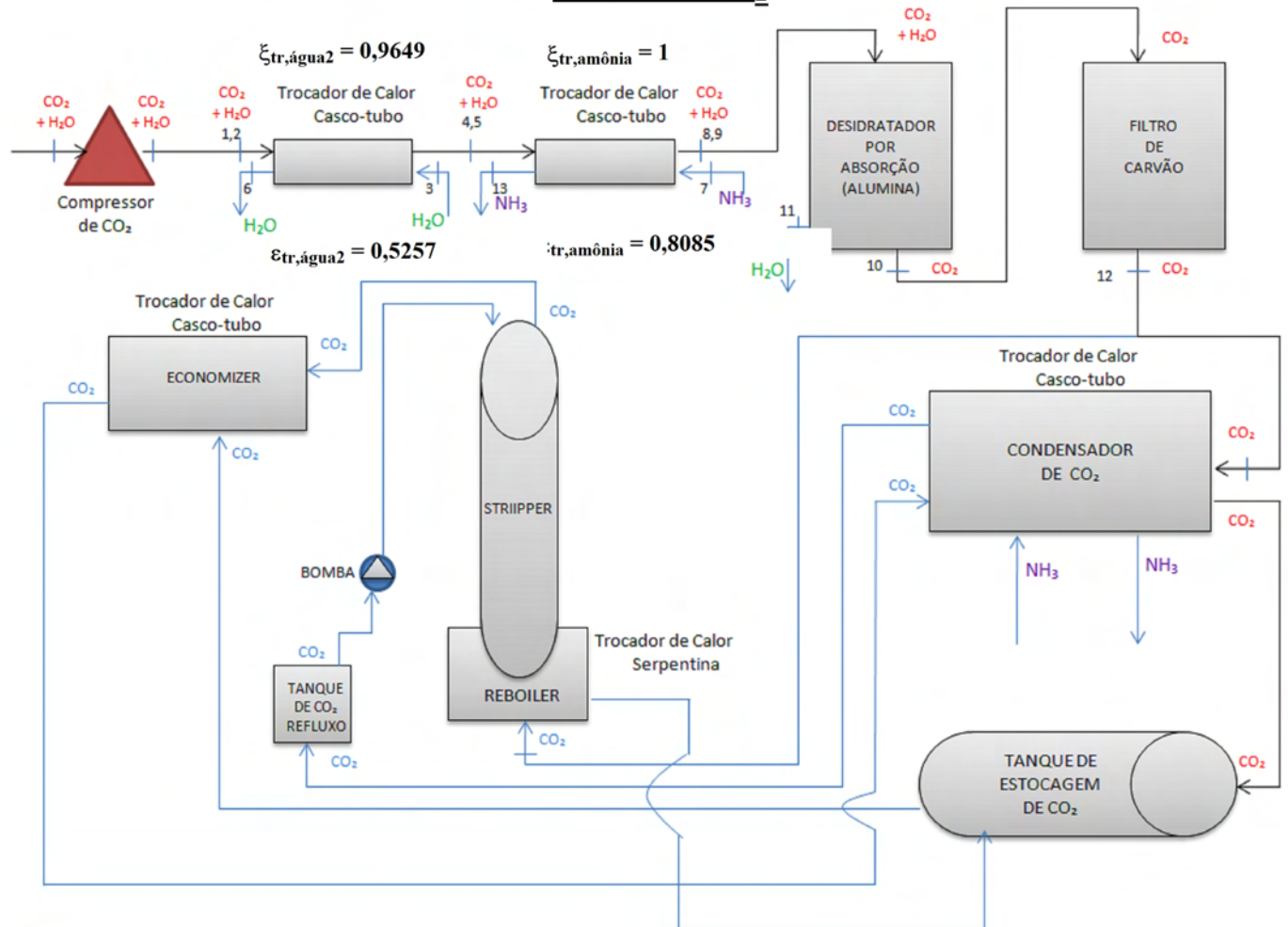
SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C; ABBOTT, M. M.; Tradução QUEIROZ, E. M. . Introdução á Termodinâmica da Engenharia Química. 7ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

SOUZA, W. L.. Análise Exergoeconômica dos Ciclos de Refrigeração por Absorção de Única Pressão. 2007. 274f. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

TORRES, E. A.. Avaliação Exergética e Termoeconômica de um Sistema de Cogeração de um Pólo Petroquímico. Tese de D.Sc., FEM/UNICAMP, Campinas, SP, 1999.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.. Princípios de Termodinâmica para Engenharia. 6ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INCROPERA, Frank P. *et al.* Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 6ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

APÊNDICE A

Equations

Modelagem Termodinâmica para o Sistema de Resfriamento da Usina de Beneficiamento de CO_2

Hipóteses gerais
- Regime Permanente;
- Serão desprezadas as energias cinéticas e potencial;
- Perdas de carga na tubulação desprezíveis;
- Perdas térmicas nas tubulações desprezíveis.

AAi

Pontos referentes ao sistema de beneficiamento de CO2

Rotina para conversão de unidade de temperatura de Celsius para Kelvin

$$\textsf{function}\ \ \mathrm{tk}(T) \tag{1}$$

$$tk \tag{2}$$

$$= \mathit{ConvertTemp}\,(\text{‘C’}\ ;\ \text{‘K’}\ ;\ T) \tag{3}$$

$$\textsf{end} \tag{4}$$

Dados

Ponto Temperatura ambiente

$$T_0 = \mathrm{tk}(25) \tag{5}$$

$$P_0 = 1\ [\mathrm{bar}] \tag{6}$$

$$s0 = \mathrm{s}\,(\mathrm{Air};\ T = T_0;\ P = P_0) \tag{7}$$

$$h0 = \mathrm{h}\,(\mathrm{Air};\ T = T_0) \tag{8}$$

Ponto 1

$$T1 = \mathrm{tk}(115) \tag{9}$$

$$P1 = 17 \tag{10}$$

$$x_1 = 0,909 \tag{11}$$

$$\dot{m}_1 = 0,42 \tag{12}$$

Ponto 2

$$\dot{m}_2 = 0,014 \tag{13}$$

$$T2 = T1 \tag{14}$$

$$P2 = P1 \tag{15}$$

$$x_2 = 0,091 \tag{16}$$

Ponto 3

$$T3 = \text{tk}(25) \tag{17}$$

$$P3 = 4 \tag{18}$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_6 \tag{19}$$

$$x_3 = 1 \tag{20}$$

Ponto4

$$T4 = \text{tk}(31) \tag{21}$$

$$P4 = 17 \tag{22}$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 \tag{23}$$

$$x_4 = x_1 \tag{24}$$

Ponto 5

$$T5 = T4 \tag{25}$$

$$P5 = P4 \tag{26}$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_2 \tag{27}$$

$$x_5 = x_2 \tag{28}$$

Ponto 6

$$T6 = \text{tk}(50) \tag{29}$$

$$P6 = 4 \tag{30}$$

$$x_6 = x_3 \tag{31}$$

Ponto 7

$$T7 = \text{tk}(-20) \tag{32}$$

$$P7 = 3 \tag{33}$$

$$x_7 = x_3 \tag{34}$$

Ponto 8

$$T8 = \text{tk}(10) \tag{35}$$

$$P8 = 17 \tag{36}$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_1 \tag{37}$$

$$x_8 = x_1 \tag{38}$$

Ponto 9

$$T9 = T8 \tag{39}$$

$$P9 = P8 \tag{40}$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_2 \tag{41}$$

$$x_9 = x_2 \tag{42}$$

Ponto 10

$$P10 = P9 \tag{43}$$

$$T10 = \text{tk}(10) \tag{44}$$

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_2 \cdot 0,3 \tag{45}$$

$$x_{10} = x_3 \tag{46}$$

Ponto 11

$$P11 = P10 \tag{47}$$

$$T11 = T10 \tag{48}$$

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_2 \cdot 0,7 \tag{49}$$

Ponto 12

$$T12 = T10 \tag{50}$$

$$P12 = P10 \tag{51}$$

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_1 \tag{52}$$

Quantidade de água na tubulação de CO2 depois do filtro de alumina

Ponto 13

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_7 \tag{53}$$

$$P13 = P7 \tag{54}$$

$$T13 = T7_{saturação} \tag{55}$$

——————————————Exergias dos pontos———————————

$$\text{duplicate } z = 1;\ 13 \tag{56}$$

$$ex_z = (h_z - h0) - T_0 \cdot (s_z - s0) \tag{57}$$

$$\text{end} \tag{58}$$

TROCADOR DE CALOR ÁGUA-CO_2

Volume de controle da água

$$\dot{Q}_{tr;água2} \cdot 0,6 = \dot{Q}_{tr;água} \tag{59}$$

eficiência na troca térmica

$$c_{v;água} = \mathrm{c_v}\ (\text{Water};\ T = T3;\ P = P3) \tag{60}$$

$$\dot{Q}_{tr;água2} = \dot{m}_6 \cdot c_{v;água} \cdot (T6 - T3) \tag{61}$$

Balanço de massa

0=$\dot{m}_{;3}$-$\dot{m}_{;6}$

1ªLei da Termodinâmica

$$0 = (\dot{m}_3 \cdot h_3 - \dot{m}_6 \cdot h_6) - \dot{Q}_{tr;água2} \tag{62}$$

calor está negativo, pois este volume de controle está recebendo o calor retirado da cerveja

2ªLei da Termodinâmica

$$0 = (\dot{m}_3 \cdot s_3 - \dot{m}_6 \cdot s_6) + \dot{Q}_{tr;água2}/T_0 - \dot{S}_{ger;tr;água2} \tag{63}$$

$$\dot{Q}_{REV;tr;água2} = \dot{m}_3 \cdot (h_3 - T_0 \cdot s_3) - \dot{m}_6 \cdot (h_6 - T_0 \cdot s_6) + (1 - T_0/T3) \cdot \dot{Q}_{tr;água2} \tag{64}$$

$$\dot{Q}_{REV;tr;água2;ex} = (\dot{m}_3 \cdot ex_3 - \dot{m}_6 \cdot ex_6) + (1 - T_0/T3) \cdot \dot{Q}_{tr;água2} \tag{65}$$

$$\dot{Q}_{REAL;tr;água2} = (\dot{m}_3 \cdot (h_3 - T_0 \cdot s_3) - \dot{m}_6 \cdot (h_6 - T_0 \cdot s_6)) + (1 - T_0/T3) \cdot \dot{Q}_{tr;água2} - T_0 \cdot \dot{S}_{ger;tr;água2} \tag{66}$$

Cálculo das irreversibilidades

$$\dot{I}_{tr;água2;GS} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger;tr;água2} \tag{67}$$

Por Gouy-Stodola.

$$\dot{I}_{tr;água2;ex} = \dot{Q}_{REV;tr;água2;ex} - \dot{Q}_{REAL;tr;água2} \tag{68}$$

Por Exergia.

GERAL

Balanço de massa

0=$\dot{m}_{;1}$-$\dot{m}_{;4}$

1ªLei da Termodinâmica

$$0 = (\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_3 \cdot h_3 - \dot{m}_6 \cdot h_6 - \dot{m}_4 \cdot h_4) - \dot{Q}_{trocador} \tag{69}$$

calor está negativo, pois este volume de controle está recebendo o calor retirado da cerveja

2ªLei da Termodinâmica

$$0 = (\dot{m}_1 \cdot s_1 + \dot{m}_3 \cdot s_3 - \dot{m}_6 \cdot s_6 - \dot{m}_4 \cdot s_4) + \dot{Q}_{trocador}/T_0 - \dot{S}_{ger;trocador} \tag{70}$$

$$\dot{Q}_{REV;trocador;ex} = (\dot{m}_1 \cdot ex_1 + \dot{m}_3 \cdot ex_3 - \dot{m}_6 \cdot ex_6 - \dot{m}_4 \cdot ex_4) + (1 - T_0/T1) \cdot \dot{Q}_{trocador} \tag{71}$$

$$\dot{I}_{trocador1;GS} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger;trocador} \tag{72}$$

$$\dot{Q}_{REAL;trocador} = \dot{Q}_{REV;trocador;ex} - \dot{I}_{trocador1;GS} \tag{73}$$

Eficiência pela 1ª Lei

$$\eta_{tr;água} = \frac{\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_3 \cdot h_3 - \dot{m}_6 \cdot h_6 - \dot{m}_4 \cdot h_4}{\dot{Q}_{trocador}} \tag{74}$$

Eficiência pela 2ª Lei

$$\epsilon_{tr;água2} = \dot{Q}_{REAL;trocador}/\dot{Q}_{REV;trocador;ex} \tag{75}$$

Grau de Perfeição Termodinâmico

$$\xi_{tr;água2} = \frac{\dot{m}_1 \cdot ex_1 + \dot{m}_3 \cdot ex_3}{(\dot{m}_4 \cdot ex_4 + \dot{m}_6 \cdot ex_6) \cdot \dot{Q}_{tr;água2} \cdot (1 - (T_0/T4))} \tag{76}$$

TROCADOR DE CALOR ÁGUA-CO_2

Volume de controle da água

Balanço de massa

0=$\dot{m}_{;1}$-$\dot{m}_{;4}$

1ªLei da Termodinâmica

$$0 = (\dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_4 \cdot h_4) - \dot{Q}_{tr;água} \quad (77)$$

calor está negativo, pois este volume de controle está recebendo o calor retirado da cerveja

2ªLei da Termodinâmica

$$0 = (\dot{m}_1 \cdot s_1 - \dot{m}_4 \cdot s_4) + \dot{Q}_{tr;água}/T_0 - \dot{S}_{ger;tr;água} \quad (78)$$

$$\dot{Q}_{REV;tr;água} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - T_0 \cdot s_1) - \dot{m}_4 \cdot (h_4 - T_0 \cdot s_4) + (1 - T_0/T1) \cdot \dot{Q}_{tr;água} \quad (79)$$

$$\dot{Q}_{REV;tr;água;ex} = (\dot{m}_1 \cdot ex_1 - \dot{m}_4 \cdot ex_4) + (1 - T_0/T1) \cdot \dot{Q}_{tr;água} \quad (80)$$

$$\dot{Q}_{REAL;tr;água} = (\dot{m}_1 \cdot (h_1 - T_0 \cdot s_1) - \dot{m}_4 \cdot (h_4 - T_0 \cdot s_4)) + (1 - T_0/T1) \cdot \dot{Q}_{tr;água} - T_0 \cdot \dot{S}_{ger;tr;água} \quad (81)$$

Cálculo das irreversibilidades

$$\dot{I}_{tr;água;GS} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger;tr;água} \quad (82)$$

Por Gouy-Stodola.

$$\dot{I}_{tr;água;ex} = \dot{Q}_{REV;tr;água;ex} - \dot{Q}_{REAL;tr;água} \quad (83)$$

Por Exergia.

TROCADOR DE CALOR AMÔNIA-CO_2

Volume de controle da amônia

$$\dot{Q}_{tr;amônia2} \cdot (-0,6) = \dot{Q}_{tr;amônia} \quad (84)$$

eficiência na troca térmica

$$c_{v;amônia} = \mathrm{c_v}\,(\text{Ammonia};\ T = T7;\ P = P7) \quad (85)$$

$$h_{líquidosat=\mathrm{h}}(\text{Ammonia};\ X{=}0;\ P{=}P7) \quad (86)$$

$$h_{vaporsat} = \mathrm{h}\,(\text{Ammonia};\ X = 1;\ P = P7) \quad (87)$$

$$T7_{saturação} = (\text{Ammonia};\ P = P7) \quad (88)$$

$$Q_{latente} = h_{vaporsat} - h_{líquidosat} \quad (89)$$

$$\dot{Q}_{tr;amônia2} = \dot{m}_7 \cdot c_{v;amônia} \cdot \left(T7_{saturação} - T7\right) + \dot{m}_7 \cdot Q_{latente} \quad (90)$$

Balanço de massa

0=$\dot{m}_{;7}$-$\dot{m}_{;13}$

1ªLei da Termodinâmica

$$0 = (\dot{m}_7 \cdot h_7 - \dot{m}_{13} \cdot h_{13}) + \dot{Q}_{tr;amônia2} \quad (91)$$

2ªLei da Termodinâmica

$$0 = (\dot{m}_7 \cdot s_7 - \dot{m}_{13} \cdot s_{13}) + \dot{Q}_{tr;amônia2}/T_0 - \dot{S}_{ger;tr;amônia2} \quad (92)$$

$$\dot{Q}_{REV;tr;amônia2} = \dot{m}_7 \cdot (h_7 - T_0 \cdot s_7) - \dot{m}_{13} \cdot (h_{13} - T_0 \cdot s_{13}) + (1 - T_0/T7) \cdot \dot{Q}_{tr;amônia2} \quad (93)$$

$$\dot{Q}_{REV;tr;amônia2;ex} = (\dot{m}_7 \cdot ex_7 - \dot{m}_{13} \cdot ex_{13}) + (1 - T_0/T7) \cdot \dot{Q}_{tr;amônia2} \quad (94)$$

$$\dot{Q}_{REAL;tr;amônia2} = (\dot{m}_7 \cdot (h_7 - T_0 \cdot s_7) - \dot{m}_{13} \cdot (h_{13} - T_0 \cdot s_{13})) + (1 - T_0/T7) \cdot \dot{Q}_{tr;amônia2} - T_0 \cdot \dot{S}_{ger;tr;amônia2} \quad (95)$$

Cálculo das irreversibilidades

$$\dot{I}_{tr;amônia2;GS} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger;tr;amônia2} \quad (96)$$

Por Gouy-Stodola.

$$\dot{I}_{tr;amônia2;ex} = \dot{Q}_{REV;tr;amônia2;ex} - \dot{Q}_{REAL;tr;amônia2} \quad (97)$$

Por Exergia.

TROCADOR DE CALOR AMÔNIA-CO_2

Volume de controle água

Balanço de massa

0=$\dot{m}_{;4}$-$\dot{m}_{;8}$

1ªLei da Termodinâmica

$$0 = (\dot{m}_4 \cdot h_4 - \dot{m}_8 \cdot h_8) + \dot{Q}_{tr;amônia} \quad (98)$$

calor está negativo, pois este volume de controle está recebendo o calor retirado da cerveja

2ªLei da Termodinâmica

$$0 = (\dot{m}_4 \cdot s_4 - \dot{m}_8 \cdot s_8) + \dot{Q}_{tr;amônia}/T_0 + \dot{S}_{ger;tr;amônia} \quad (99)$$

$$\dot{Q}_{REV;tr;amônia} = \dot{m}_4 \cdot (h_4 - T_0 \cdot s_4) - \dot{m}_8 \cdot (h_8 - T_0 \cdot s_8) + (1 - T_0/T4) \cdot \dot{Q}_{tr;amônia} \quad (100)$$

$$\dot{Q}_{REV;tr;amônia;ex} = (\dot{m}_4 \cdot ex_4 - \dot{m}_8 \cdot ex_8) + (1 - T_0/T4) \cdot \dot{Q}_{tr;amônia} \quad (101)$$

$$\dot{Q}_{REAL;tr;amônia} = (\dot{m}_4 \cdot (h_4 - T_0 \cdot s_4) - \dot{m}_8 \cdot (h_8 - T_0 \cdot s_8)) + (1 - T_0/T4) \cdot \dot{Q}_{tr;amônia} - T_0 \cdot \dot{S}_{ger;tr;amônia} \quad (102)$$

Cálculo das irreversibilidades

$$\dot{I}_{tr;amônia;GS} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger;tr;amônia} \tag{103}$$

Por Gouy-Stodola.

$$\dot{I}_{tr;amônia;ex} = \dot{Q}_{REV;tr;amônia;ex} - \dot{Q}_{REAL;tr;amônia} \tag{104}$$

Por Exergia.

Eficiência pela 1ª Lei

$$\eta_{tr;amônia} = \frac{(\dot{m}_4 \cdot h_4 - \dot{m}_8 \cdot h_8)}{-\dot{Q}_{tr;amônia}} \tag{105}$$

Eficiência pela 2ª Lei

$$\epsilon_{tr;amônia} = \frac{\dot{m}_4 \cdot ex_4 - \dot{m}_8 \cdot ex_8}{\dot{Q}_{tr;amônia} \cdot (1 - (T_0/T4))} \tag{106}$$

$$\xi_{tr;amônia} = \frac{\dot{m}_4 \cdot ex_4 + \dot{m}_7 \cdot ex_7}{\dot{m}_{13} \cdot ex_{13} + \left(\dot{Q}_{tr;amônia} \cdot (1 - (T_0/T7))\right) + \dot{m}_8 \cdot ex_8} \tag{107}$$

Propriedades para o fluido refrigerado CO2

ponto 1

$$h_1 = \text{h}\,(\text{CarbonDioxide};\ T = T1;\ P = P1) \tag{108}$$

$$s_1 = \text{s}\,(\text{CarbonDioxide};\ T = T1;\ P = P1) \tag{109}$$

$$v_1 = \text{v}\,(\text{CarbonDioxide};\ T = T1;\ P = P1) \tag{110}$$

ponto 4

$$h_4 = \text{h}\,(\text{CarbonDioxide};\ T = T4;\ P = P4) \tag{111}$$

$$s_4 = \text{s}\,(\text{CarbonDioxide};\ T = T4;\ P = P4) \tag{112}$$

$$v_4 = \text{v}\,(\text{CarbonDioxide};\ T = T4;\ P = P4) \tag{113}$$

ponto 8

$$h_8 = \text{h}\,(\text{CarbonDioxide};\ T = T8;\ P = P8) \tag{114}$$

$$s_8 = \text{s}\,(\text{CarbonDioxide};\ T = T8;\ P = P8) \tag{115}$$

$$v_8 = \text{v}\,(\text{CarbonDioxide};\ T = T8;\ P = P8) \tag{116}$$

Propriedades para o fluido refrigerado H2O

ponto 2

$$h_2 = \mathrm{h}\left(\mathrm{Steam};\ T = \mathit{T2};\ P = \mathit{P2}\right) \tag{117}$$

$$s_2 = \mathrm{s}\left(\mathrm{Steam};\ T = \mathit{T2};\ P = \mathit{P2}\right) \tag{118}$$

$$v_2 = \mathrm{v}\left(\mathrm{Steam};\ T = \mathit{T2};\ P = \mathit{P2}\right) \tag{119}$$

ponto 5

$$h_5 = \mathrm{h}\left(\mathrm{Steam};\ T = \mathit{T5};\ P = \mathit{P5}\right) \tag{120}$$

$$s_5 = \mathrm{s}\left(\mathrm{Steam};\ T = \mathit{T5};\ P = \mathit{P5}\right) \tag{121}$$

$$v_5 = \mathrm{s}\left(\mathrm{Steam};\ T = \mathit{T5};\ P = \mathit{P5}\right) \tag{122}$$

ponto 9

$$h_9 = \mathrm{h}\left(\mathrm{WATER};\ T = \mathit{T9};\ P = \mathit{P9}\right) \tag{123}$$

$$s_9 = \mathrm{s}\left(\mathrm{WATER};\ T = \mathit{T9};\ P = \mathit{P9}\right) \tag{124}$$

$$v_9 = \mathrm{v}\left(\mathrm{WATER};\ T = \mathit{T9};\ P = \mathit{P9}\right) \tag{125}$$

Propriedades para o fluido refrigerante H2O

ponto 3

$$h_3 = \mathrm{h}\left(\mathrm{WATER};\ T = \mathit{T3};\ P = \mathit{P3}\right) \tag{126}$$

$$s_3 = \mathrm{s}\left(\mathrm{WATER};\ T = \mathit{T3};\ P = \mathit{P3}\right) \tag{127}$$

$$v_3 = \mathrm{v}\left(\mathrm{WATER};\ T = \mathit{T3};\ P = \mathit{P3}\right) \tag{128}$$

ponto 6

h[6]=ENTHALPY(WATER;T=T6;P=P6)

$$s_6 = \mathrm{s}\left(\mathrm{WATER};\ T = \mathit{T6};\ P = \mathit{P6}\right) \tag{129}$$

$$v_6 = \mathrm{v}\left(\mathrm{WATER};\ T = \mathit{T6};\ P = \mathit{P6}\right) \tag{130}$$

ponto 10

$$h_{10} = \mathrm{h}\left(\mathrm{WATER};\ T = \mathit{T10};\ P = \mathit{P10}\right) \tag{131}$$

$$s_{10} = \mathrm{s}\left(\mathrm{WATER};\ T = \mathit{T10};\ P = \mathit{P10}\right) \tag{132}$$

$$v_{10} = \mathrm{v}\left(\mathrm{WATER};\ T = \mathit{T10};\ P = \mathit{P10}\right) \tag{133}$$

ponto 11

$$h_{11} = \mathrm{h}\left(\mathrm{WATER};\ T = T11;\ P = P11\right) \quad (134)$$

$$s_{11} = \mathrm{s}\left(\mathrm{WATER};\ T = T11;\ P = P11\right) \quad (135)$$

$$v_{11} = \mathrm{v}\left(\mathrm{WATER};\ T = T11;\ P = P11\right) \quad (136)$$

ponto 12

$$h_{12} = \mathrm{h}\left(\mathrm{CarbonDioxide};\ T = T12;\ P = P12\right) \quad (137)$$

$$s_{12} = \mathrm{s}\left(\mathrm{CarbonDioxide};\ T = T12;\ P = P12\right) \quad (138)$$

$$v_{12} = \mathrm{v}\left(\mathrm{CarbonDioxide};\ T = T12;\ P = P12\right) \quad (139)$$

Propriedades para o fluido refrigerante Amônia

ponto 7

$$h_7 = \mathrm{h}\left(\mathrm{R717};\ T = T7;\ P = P7\right) \quad (140)$$

$$s_7 = \mathrm{s}\left(\mathrm{R717};\ T = T7;\ P = P7\right) \quad (141)$$

$$v_7 = \mathrm{v}\left(\mathrm{R717};\ T = T7;\ P = P7\right) \quad (142)$$

Ponto 13

$$s_{13} = \mathrm{s}\left(\mathrm{Ammonia};\ h = h_{13};\ P = P13\right) \quad (143)$$

$$v_{13} = \mathrm{v}\left(\mathrm{Ammonia};\ h = h_{13};\ P = P13\right) \quad (144)$$

Solution

$c_{v;amônia} = 3,691$ [kJ/kg.K] $c_{v;água} = 4,138$ [kJ/kg.K] $\epsilon_{tr;amônia} = 0,8085$
$\epsilon_{tr;água2} = 0,5257$ $\eta_{tr;amônia} = 1$ $\eta_{tr;água} = 1$
$h0 = 298,6$ [kJ/kg] $h_{líquidosat=157,5}$ [kJ/kg] $h_{vaporsat} = 1452$ [kJ/kg]
$\dot{I}_{trocador1;GS} = 65,75$ [kW] $\dot{I}_{tr;amônia2;ex} = -1,913$ [kW] $\dot{I}_{tr;amônia2;GS} = -1,913$ [kW]
$\dot{I}_{tr;amônia;ex} = -0,1402$ [kW] $\dot{I}_{tr;amônia;GS} = -0,1402$ [kW] $\dot{I}_{tr;água2;ex} = 1,691$ [kW]
$\dot{I}_{tr;água2;GS} = 1,691$ [kW] $\dot{I}_{tr;água;ex} = 64,06$ [kW] $\dot{I}_{tr;água;GS} = 64,06$ [kW]
$P1 = 17$ [bar] $P10 = 17$ [bar] $P11 = 17$ [bar]
$P12 = 17$ [bar] $P13 = 3$ [bar] $P2 = 17$ [bar]
$P3 = 4$ [bar] $P4 = 17$ [bar] $P5 = 17$ [bar]
$P6 = 4$ [bar] $P7 = 3$ [bar] $P8 = 17$ [bar]
$P9 = 17$ [bar] $P_0 = 1$ [bar] $\dot{Q}_{REAL;trocador} = 72,87$ [kW]
$\dot{Q}_{REAL;tr;amônia} = -0,1734$ [kW] $\dot{Q}_{REAL;tr;amônia2} = 1,221$ [kW] $\dot{Q}_{REAL;tr;água} = -51,48$ [kW]
$\dot{Q}_{REAL;tr;água2} = 111,1$ [kW] $\dot{Q}_{REV;trocador;ex} = 138,6$ [kW] $\dot{Q}_{REV;tr;amônia} = -0,3136$ [kW]
$\dot{Q}_{REV;tr;amônia2} = -0,6918$ [kW] $\dot{Q}_{REV;tr;amônia2;ex} = -0,6918$ [kW] $\dot{Q}_{REV;tr;amônia;ex} = -0,3136$ [kW]
$\dot{Q}_{REV;tr;água} = 12,58$ [kW] $\dot{Q}_{REV;tr;água2} = 112,8$ [kW] $\dot{Q}_{REV;tr;água2;ex} = 112,8$ [kW]

$\dot{Q}_{REV;tr;água;ex} = 12,58$ [kW]
$\dot{Q}_{trocador} = 91,57$
$\dot{Q}_{tr;amônia} = -8,791$ [kW]
$\dot{Q}_{tr;amônia2} = 14,65$ [kW]
$\dot{Q}_{tr;água} = 34,34$ [kW]
$\dot{Q}_{tr;água2} = 57,23$ [kW]
$Q_{latente} = 1294$ [kJ]
$s0 = 5,699$ [kJ/kg.K]
$\dot{S}_{ger;trocador} = 0,2205$ [kW/K]
$\dot{S}_{ger;tr;amônia} = -0,0004703$ [kW/K]
$\dot{S}_{ger;tr;amônia2} = -0,006415$ [kW/K]
$\dot{S}_{ger;tr;água} = 0,2149$ [kW/K]
$\dot{S}_{ger;tr;água2} = 0,005672$ [kW/K]
$T1 = 388,2$ [K]
$T10 = 283,1$ [K]
$T11 = 283,1$ [K]
$T12 = 283,1$ [K]
$T13 = 263,9$ [K]
$T2 = 388,2$ [K]
$T3 = 298,1$ [K]
$T4 = 304,1$ [K]
$T5 = 304,1$ [K]
$T6 = 323,1$ [K]
$T7 = 253,2$ [K]
$T7_{saturação} = 263,9$ [K]
$T8 = 283,1$ [K]
$T9 = 283,1$ [K]
$T_0 = 298,1$ [K]
$\xi_{tr;amônia} = 1$
$\xi_{tr;água2} = 0,9649$

Arrays

Row	$\dot{m}_i$ [kg/s]	x_i	h_i [kJ/kg]	s_i [kJ/kg.K]	v_i [m^3]	ex_i [kJ/kg]
1	0,42	0,909	70,69	-0,3163	0,04164	1566
2	0,014	0,091	483,6	1,472	0,001055	1445
3	0,5532	1	105,1	0,3668	0,001003	1396
4	0,42	0,909	-11,07	-0,5536	0,03097	1555
5	0,014	0,091	131,4	0,4498	0,4498	1398
6	0,5532	1	1,674	0,7036	0,001012	1193
7	0,01098	1	108,6	0,6534	0,001503	1314
8	0,42	0,909	-32	-0,625	0,02804	1555
9	0,014	0,091	43,64	0,1508	0,0009995	1399
10	0,0042	1	43,64	0,1508	0,0009995	1399
11	0,0098		43,64	0,1508	0,0009995	1399
12	0,42		-32	-0,625	0,02804	1555
13	0,01098		1443	5,711	0,4032	1140

ANEXO A

%Hum X	Wt % Y
0	0
2,2	5
4,4	10
6,6	15
8,8	20
11	25
13,2	30
15,4	35
17,6	40
19,8	45
21	50

Tabela 6: Umidade em % X peso de água adsorvida em %.(Usina 1200 kg/h)

Descobrir a função do 1º grau que contém os pontos (2,2:5) e (4,4:10) .

Solução: A função do 1º grau tem a forma y = ax + b . Vamos substituir nessa expressão os dois dados.

Substituindo (2,2:5) → 5 = a . 2,2 + b

Substituindo (4,4:10) → 10 = a . 4.4 + b

Organizando essas equações, temos um sistema :

$$2{,}2a + b = 5$$

$$4{,}4a + b = 10$$

Para resolver, vamos trocar os sinais da primeira equação e depois somar :

$$1)\ -2{,}2a - b = -5$$

$$2)\ 4{,}4\ a + b = 10$$

$$2{,}2a = 5 \rightarrow a = 2{,}273$$

Substituindo a = 2,273 na primeira equação temos:

$$-\ 2{,}2 \times 2{,}273 + b = -5$$

$$b = -\ 5 + 2{,}2 \times 2{,}273$$

$$b = 0$$

Logo a função procurada e y = 2,273.x

- Vazão entrada: 1500Kg/h
- Umidade relativa do flúido: 10%
- Peso de água adsorvido para vazão 1200Kg/h: 4,4% = 52,8 Kg

Logo, dos 150Kg de água, que representa 10% da vazão de entrada, apenas 52,8Kg foram adsorvido pela alumina.

$$150 - 52.8 = 97,2$$

$$1500 - 52,8 = 1447,2$$

$$\begin{cases} 1447,2 \rightarrow 100\% \\ 97,2 \quad \rightarrow \ X\,\% \end{cases}$$

$$X = 100 \times 97,2 / 1447,2 = 6,71\%$$

$$X = 6,71\%$$

ANEXO B

Diariamente

1. Lavadores e Balão:

- Verificar a vazão de água na entrada do pós-lavador;
- Verificar o nível de água no pós-lavador;
- Verificar a coloração da solução de permanganato de potássio;
- Verificar o nível da solução de permanganato de potássio dentro da torre lavadora;
- Verificar o nível de água no pré-lavador.

2. Compressores de CO_2:

- Certifique-se que os drenos automáticos de água dos separadores de água no resfriador intermediário e “aftercooler” dos compressores de CO_2 estão funcionando de forma correta. Em caso de dúvida, abra as válvulas manuais próximas ao dreno. Apenas uma pequena quantidade de condensado deverá ser notada;
- Verificar nível de óleo através dos visores.

Efetuar a drenagem de água a cada 04 horas se houver, nos seguintes pontos:

- Tubulação de entrada do balão;
- Tubulação de saída do balão;
- Sucção dos compressores de CO2.

- Desidratadores:
- Verificar a vazão no rotâmetro;
- Procurar por vazamentos na linha pneumática;
- Verificar e anotar temperaturas e pressões durante a regeneração dos vasos;
- Verificar e anotar o "status" de regeneração/operação dos vasos

Comparar os valores dos setpoints inseridos

- Alarmes devem ser verificados e as ações tomadas de acordo com as descrições contidas no manual de operação e manutenção da usina.

Sistema de Purificação:

- Verificar se não há vazamento de CO_2 líquido pelo selo da bomba. Em caso de vazamento parar imediatamente a bomba danificada para reparos. Ver adiante os procedimentos para manutenção da bomba de CO_2;
- Verificar e anotar as pressões na descarga das bombas;
- Verificar e anotar a temperatura do CO_2 gás na saída do "Reboiler", através do termômetro TI151170. Aumento significativo no valor da temperatura com a usina em operação pode ser um indicativo de congelamento na serpentina interna ao "Reboiler". Ver adiante os procedimentos para manutenção do "Reboiler".

Condensador de CO_2:

- Verificar a vazão no rotâmetro;
- Verificar a pressão na válvula reguladora;
- Verificar o funcionamento do sistema de purga dos gases inertes. Pressão elevada no condensador de CO_2 combinada com uma baixa pressão na sucção do compressor de NH_3 existentes pode ser um indicativo de acúmulo excessivo dos gases inertes no topo do vaso;
- Verificar e anotar o nível de NH_3.

Compressor de NH_3:

- Verificar nível de óleo através do visor;

Semanalmente

Lavadores e Balão:

- Limpar o filtro;
- Efetuar a retro lavagem do filtro declorador, conforme descrito abaixo:

1. Abrir a válvula “by-pass”;
2. Fechar a válvula de entrada do filtro declorador;
3. Abrir lentamente a válvula de dreno do declorador. Fechar a válvula de dreno do declorador;
4. Abrir a válvula de entrada do filtro declorador;
5. Fechar a válvula “by-pass”.

- Verificar/ajustar a vazão da solução de permanganato, conforme descrito abaixo:

1. Desligar a bomba de permanganato;
2. Aguardar 5 minutos para se garantir o assentamento total do líquido na torre;
3. Efetuar a marcação do nível, indicado por;
4. Ligar a bomba de permanganato;
5. Com um cronômetro, verificar se o nível de solução cai 60 mm em 10 segundos;
6. Caso o nível baixe mais de 60 mm nesse intervalo de tempo, restringir um pouco mais a válvula na descarga da bomba. Caso o nível baixe menos de 60 mm nesse intervalo de tempo, abrir um pouco mais a válvula;
7. Repita os passos 1 a 7 até que o ajuste esteja correto. Isso garantirá uma vazão de $8m^3/h$, necessária para uma recuperação contínua de CO_2 de 1000 kg/h.

- Limpar o manômetro na descarga da bomba de permanganato, para se evitar o acúmulo de cristais da solução e a incorreta leitura da pressão.
- Verificar o funcionamento do pêndulo do balão.

Compressores de CO_2:

- Verificar o tensionamento e alinhamento das correias;
- Limpar os filtros de etanol e água.

Condensador de CO_2:

• Drenar óleo do condensador de CO_2, conforme descrito abaixo:

1. Fechar a válvula manual;
2. Certificar de que a válvula piloto esteja parcialmente aberta. Para isso, basta girar o registro piloto em sentido anti-horário até o fim (abertura total da válvula), e posteriormente girá-lo uma volta completa no sentido horário;
3. Certificar de que a válvula esteja fechada;
4. Aguardar 24 horas. Esse período deve ser suficiente para que toda amônia remanescente na tubulação de drenagem evapore e retorne ao sistema através da válvula piloto;
5. Abrir a válvula;
6. Abrir a válvula de dreno para a retirada do óleo;
7. Finalizada a drenagem, fechar a válvula;
8. Abrir a válvula manual.

A cada 2 semanas

Filtros de carvão ativado e desidratadores:

- Observar a queda de pressão no filtro de partículas, verificando o diferencial de pressão entre os manômetros instalados no filtro;
- Limpar os filtros localizados nos ventiladores.

A cada 3 meses

- Limpar o filtro de sucção da bomba de dreno;
- Limpar o filtro de sucção da bomba de refluxo;
- Limpar o filtro do sistema de injeção de amônia (NH_3);
- Calibrar o transmissor de pureza do CO2;
- Verificar o alinhamento do acoplamento do compressor de NH3;
- Limpar o fundo da torre de permanganato dos sais e cristais acumulados.

A cada ano

- Certificar-se que todos os transmissores de temperatura e pressão estão ajustados corretamente;

6. Certificar-se que todas as válvulas de segurança estão ajustadas corretamente;
7. Certificar-se que o óleo na planta de refrigeração está em boas condições (limpo e transparente);
8. Certificar-se que o óleo nos compressores de CO_2 está em boas condições (limpo e transparente);
9. Trocar o óleo em caso de mudança de cor;
10. Trocar o carvão ativado no filtro declorador.

A cada 2 anos

- (máx. 12,000 h de operação dos compressores de CO_2):

Trocar os elementos de secagem dos Desidratadores; Trocar o carvão ativado nos filtros de carvão.